



UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA
INDUSTRIAL**

- PROYECTO FINAL DE CARRERA -

APLICACIÓN DE LA EXERGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE INDICADORES DEL APROVECHAMIENTO DEL AGUA

Autor:	Tomás Moreno Castillo
Directores:	Amaya Martínez Gracia Javier Uche Marcuello
Especialidad:	Mecánica
Convocatoria:	Mayo 2011

APLICACIÓN DE LA EXERGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE INDICADORES DEL APROVECHAMIENTO DEL AGUA.

Tomás Moreno Castillo.

Proyecto Final de Carrera presentado para la obtención del título de Ingeniero Técnico Industrial, especialidad Mecánica.

Universidad de Zaragoza, España.

Resumen

No va a descubrirse aquí la importancia del agua. El agua es fundamental para la vida, y un recurso cada vez más escaso debido al incremento de la población. La mayoría de los aprovechamientos que el ser humano hace del agua tienen lugar gracias a los ríos. Por este motivo, es de vital importancia llevar un control lo más exhaustivo posible de lo que se está haciendo con el agua de los ríos en cada momento.

En este contexto nació, en el año 2000, la Directiva Marco del Agua, fruto de un extenso proceso de discusión, debate y puesta en común de ideas entre un amplio abanico de expertos, usuarios del agua, medioambientalistas y políticos, que por consenso sentaron los principios fundamentales de la gestión moderna de los recursos hídricos.

A partir de la concienciación que está teniendo lugar recientemente acerca del uso del agua, surge esta idea de emplear la exergía como indicador del estado del agua de los ríos.

Así, mediante la medición de multitud de parámetros a lo largo del río Ebro y la posterior realización de los cálculos pertinentes, se estudia la utilidad y la viabilidad del establecimiento de la exergía como indicador del estado del río.

Un indicador que habla tanto de calidad como de cantidad y que sirve para medir tanto contaminaciones como ratios de aprovechamientos.

Agradecimientos:

Quiero dedicar unas breves palabras de agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo:

A Amaya y Javier, gracias por dirigirme a lo largo y ancho de este proyecto, por toda la paciencia que a buen seguro habéis tenido conmigo y por acercarme a la realidad del trabajo de investigación.

A todas las personas de las diferentes organizaciones que en su día resolvieron mis dudas y necesidades con diligencia: a José Luis Montero, de la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino; a Noelia Guaita, del Observatorio de Sostenibilidad en España; y a todo el personal de la Confederación Hidrográfica del Ebro: a Sergio Gimeno y José M^a Sanz, del centro de control de calidad SAICA; a Vicente Sancho-Tello, de Calidad de Aguas; a Alfredo Beltrán, de la Comisaría de Aguas; y a Miguel Ángel García, de la Oficina de Planificación Hidrológica. Gracias a todos por ayudar de buen agrado.

A mis amigos, a los que después de la cantidad de veces que os he dicho “no, tengo que trabajar”, todavía me seguís llamando cuando hay plan, gracias.

A Marina, gracias por no dejarme caer en el desánimo, y por ungirme con tu afán de superación. Gracias por hacerme sonreír.

A mis padres, por empujarme toda la vida sin descansar un solo instante, gracias por vuestra paciencia y por vuestro tesón. Sabéis lo que significáis para mí y lo mucho que os quiero.

Contenido:

Resumen.....	I
Agradecimientos:	II
Contenido:	III
0. Objeto y alcance del Proyecto.	1
1. Introducción: los indicadores.	2
1.1. Funciones y características de los indicadores.	3
1.2. Índices y conjuntos de indicadores.	4
2. Clasificación de los indicadores. Marcos conceptuales.	6
2.1. Esquema Presión-Estado-Respuesta (PSR).	7
2.1.1. Indicadores de presión.	8
2.1.2. Indicadores de estado.	9
2.1.3. Indicadores de respuesta.	10
2.2. Esquema Factor determinante-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (DPSIR).	11
3. Indicadores en el mundo del agua.	13
3.1. Aplicación del modelo DPSIR por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.....	14
3.2. Elección del objeto de estudio. ¿Por qué el río Ebro?	18
4. El río Ebro.....	19
4.1. La cuenca.....	20
4.2. La Confederación Hidrográfica del Ebro.	21
4.3. Usos del agua.	22
4.3.1. Abastecimiento de la población.	24
4.3.2. Aprovechamientos agrarios.	25
4.3.3. Usos industriales no energéticos	26
4.3.4. Usos energéticos.	27
4.4. El sistema SAIH, las redes de estaciones SAICA y CEMAS. Medición de parámetros a lo largo del cauce.....	29
4.4.1. Midiendo la cantidad: el SAIH	30

4.4.2. Midiendo la calidad: redes de estaciones CEMAS y SAICA.	31
5. Propuesta de nuevos indicadores: exergía, perfil exergético y coste exergético.	32
5.1. Definiciones.....	32
5.1.1. Exergía. Generalidades.	33
5.1.2. Exergoecología.	34
5.1.3. Estados ecológicos de los ecosistemas.	35
5.1.4. Coste exergético.	36
5.1.5. Hidronomía Física.	37
5.1.6. Directiva Marco del Agua.	39
5.2. Ecuación general de la exergía aplicada al río Ebro.....	40
5.2.1. Exergía térmica.....	42
5.2.2. Exergía mecánica.....	43
5.2.3. Exergía potencial.	44
5.2.4. Exergía cinética.....	45
5.2.5. Exergía química de formación.....	46
5.2.6. Exergía química de concentración.	48
6. Procedimiento seguido.....	49
6.1. División en tramos de la cuenca.	51
6.2. Recogida de datos.....	52
6.2.1. El visor cartográfico de la Confederación: SITEbro (Sistema de Información Territorial del Ebro).	53
6.2.2. SAIH. Petición de datos históricos.....	55
6.2.3. CEMAS. Composición del agua.....	57
6.3. Simulación en Aquatool: SIMGES & GESCAL.....	61
6.4. Cálculos en EES.....	62
7. Resumen de resultados.	63
7.1. Variación del caudal.	63
7.1.1. Variación del caudal a lo largo del tiempo.	64
7.1.1. Variación del caudal a lo largo del cauce.	65
7.2. Variación de los parámetros físico-químicos.	68

7.2.1. Altura.....	68
7.2.2. Temperatura.....	69
7.2.3. Conductividad.....	71
7.2.4. Carbono Orgánico Total (COT).	73
7.3. Variación de la calidad en términos de exergía específica.	75
7.3.1. Exergía potencial específica.	76
7.3.2. Exergía térmica específica.	77
7.3.3. Exergía química inorgánica específica.....	79
7.3.4. Exergía química orgánica específica.....	81
7.4. Variación de componentes absolutas de la exergía.	83
7.4.1. Exergía potencial absoluta.	83
7.4.2. Exergía térmica absoluta.	86
7.4.3. Exergía química inorgánica absoluta.....	88
7.4.4. Exergía química orgánica absoluta.....	90
7.5. Perfiles. Resumen de resultados de la integración a lo largo del cauce.....	92
8. Indicadores propuestos.	96
8.1. Índice de Uso Potencial.....	97
8.2. Índice de Uso Térmico.....	98
8.3. Índice de Uso Químico. Coste de Desalación Potencial.....	100
9. Conclusiones: ¿qué información adicional aportan los indicadores relacionados con la exergía?	101
Bibliografía	103
Índice de tablas.....	104
Índice de figuras.....	105
Índice de gráficas.	106

0. Objeto y alcance del Proyecto.

El objeto de este Proyecto Final de Carrera es analizar, desde el punto de vista exergético, el cauce principal del río Ebro.

Dicho análisis se lleva a cabo mediante la elaboración de los correspondientes perfiles exergéticos del río, que dan información sobre la cantidad y calidad del agua en las mismas unidades objetivas de medida (unidades energéticas), y también a través del cálculo de indicadores físicos, que permiten conocer el grado de aprovechamiento de las distintas potencialidades que el río ofrece.

El alcance del trabajo aquí presentado está condicionado por el contexto en el que se ha desarrollado: un proyecto mucho más amplio en el que el área de Agua y Energía de la división de Recursos Naturales de la Fundación CIRCE (Universidad de Zaragoza) está trabajando desde hace varios años.

De este modo, alguno de los datos utilizados derivan de trabajos previos y/o paralelos dentro del grupo de investigación, en los que el proyectando ha trabajado en colaboración con el equipo. La parte más relevante de esta colaboración radica en los datos utilizados para los cálculos iniciales, que son fruto de una simulación de la cuenca en el programa Aquatool.

El tratamiento de los datos, los cálculos de exergía y contenido exergético de la cuenca y la definición de indicadores han sido trabajo elaborado para este Proyecto Fin de Carrera que va a seguir desarrollándose dentro del citado grupo de investigación.

1. Introducción: los indicadores.

En casi todas las actividades que precisan la toma de alguna decisión se emplean indicadores, aunque puede que no se sea totalmente consciente de ello. La definición de indicar es: “Comunicar, explicar, dar a entender una cosa con indicios o señales. Significar una cosa algo. Señalar, advertir, manifestar, apuntar, mostrar”. En otras palabras, la información que permite conocer algo es un indicador, y dicha información puede conducir a tomar unas decisiones u otras. Un ejemplo cercano: la temperatura del cuerpo o la presión arterial son indicadores del estado de salud y según su valor se puede decidir si visitar o no al médico.

Los indicadores se emplean en todos los campos; con diferentes complejidades; desde sencillos, como el color de una fruta que indica su nivel de madurez, hasta más complejos, como la concentración de agentes inmunológicos para detectar cáncer.

La utilización de indicadores está muy extendida, pero no existe una definición única. La más conocida y aceptada es la que dicta la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE): un indicador es “un parámetro o valor derivado de varios parámetros que proporciona información relativa a un estado o proceso, con un significado que va más allá del directamente asociado al valor del parámetro en sí mismo” (OCDE, 1994). Por su parte, el Ministerio de Medio Ambiente de Canadá lo define como una estadística o parámetro que, monitoreado a través del tiempo, proporciona información de la tendencia o las condiciones de un fenómeno más allá de la que se asocia a la estadística en sí misma (Environment Canada).

Hay que hacer notar que a menudo se emplean las palabras “parámetro” e “índice” como sinónimos de indicador, pero no tienen el mismo significado. Un parámetro es definido como cualquier propiedad que es medida u observada, mientras que un índice consiste en un conjunto agregado o ponderado de parámetros o indicadores (OCDE, 2001).

1.1. Funciones y características de los indicadores.

La importancia de los indicadores radica en el uso que se puede hacer de ellos. Deben informar y ayudar a esclarecer un tema para conducir a una buena toma de decisiones. Son una excelente herramienta de información al público porque ilustran información científica, contribuyendo al entendimiento de los temas y a que la sociedad tome un papel activo en la solución de problemas.

Las funciones principales, en resumen, de los indicadores son (OCDE, 2004):

1. Informar sobre el estado del medio.
2. Evaluar el desempeño de políticas.
3. Comunicar los progresos en la búsqueda del desarrollo.

No obstante, para que los indicadores cumplan con estas funciones es necesario que tengan ciertas características. La Academia Nacional de la Ciencia de los Estados Unidos (National Academy of Science) dicta una serie de preguntas relevantes en este aspecto:

- i) ¿El tema es relevante? ¿El indicador provee información acerca de cambios o procesos de relevancia?
- ii) ¿Se basa en un modelo conceptual aceptado, bien entendido y con buen sustento científico?
- iii) ¿Ha probado su utilidad?
- iv) ¿Tiene la suficiente resolución espacial o temporal para evaluar cambios o situaciones?
- v) ¿Es suficientemente robusto como para distinguir entre variabilidad natural o la atribuible a la medición del comportamiento real del fenómeno en estudio?
- vi) ¿Los datos que se requieren para documentar el indicador se pueden obtener y ser confiables?
- vii) ¿Existe información clara de cómo fue obtenido cada dato (por ejemplo, método de cálculo, instrumento utilizado, etc.)?

Se concluye evidentemente que la correcta elaboración de un determinado indicador ha de cimentarse en respuestas afirmativas a las anteriores cuestiones.

1.2. Índices y conjuntos de indicadores.

Cuando se utiliza un parámetro o indicador para describir una situación, comúnmente ocurre que no refleja bien las condiciones del sistema o las simplifica, de modo que resulta inútil o incluso falaz. Por ello, a menudo se recurre a la confección de índices y conjuntos de indicadores.

Con frecuencia se comete el error de sacar conclusiones a partir de los resultados de un solo indicador. Por ejemplo, una reducción en la generación de basura por habitante no implica necesariamente que se esté avanzando en el cuidado del ambiente, ya que podría ser resultado de una menor capacidad de compra derivada de un descenso en los ingresos o, incluso, de un mayor desempleo. Otro ejemplo es el volumen de pesca como indicador de la salud de las poblaciones de peces. Bajo el argumento “si las poblaciones están bien se pescan más ejemplares”, se puede llegar a conclusiones erróneas, ya que existe la posibilidad de que el incremento en el volumen de pesca se deba más bien a una mejora en la técnica de captura; la interpretación equivocada podría sugerir que es posible incrementar la pesca, lo que traería consigo una sobreexplotación del recurso.

En asuntos complejos, obtener y manejar índices es muy interesante, porque permiten un enfoque global de la situación.

El gran desafío de los índices es demostrar que sus valoraciones verdaderamente reflejan la situación existente. Las críticas más frecuentes se enfocan en estos tres aspectos (OCDE, 2004):

- i) razones y criterios para seleccionar las variables que contiene el índice,
- ii) el modo de ponderar estas variables (es decir, los algoritmos empleados) y
- iii) la heterogeneidad a la hora de abarcar muchas cuestiones o comparar entre países.

La forma de perfeccionar los índices y sistemas de indicadores es localizando algunos de los errores frecuentes:

- Simplificar demasiado los temas y, con ello, malinterpretar el fenómeno. Por ejemplo, es habitual emplear el número de especies como un indicador de salud de un ecosistema, bajo la lógica de que los ecosistemas desequilibrados perderán especies, pero frecuentemente ocurre que un sistema perturbado de forma reciente o con desequilibrios no muy intensos aumentan su número de especies por la intrusión de especies exóticas.
- El sintetizado en índices puede conducir a resultados tan abstractos que entorpezcan su entendimiento. En este caso, la norma es que no esencialmente un conjunto mayor de elementos conformará un mejor indicador.
- Un error frecuente es que reflejen la experiencia personal de quienes los forman en vez de las necesidades de la sociedad. Por esto, se recomienda que estos procesos sean participativos y que reúnan ideas e intereses tanto de las partes académicas y gubernamentales, como del sector civil.
- Es importante que los indicadores sean flexibles y revisados periódicamente. Si es necesario, deben ser transformados para reflejar mejor las situaciones y tendencias, y así cuidar su utilidad. Ejemplo: hace 100 años, la mortalidad a causa de viruela quizá fue un buen indicador; en la actualidad no lo es. En el mismo sentido, si entonces se hubieran utilizado las defunciones por VIH o los desórdenes relacionados con la obesidad como indicadores de salud indudablemente habrían tenido poca utilidad, mientras que en la actualidad tienen mucha relevancia.

Desafortunadamente, la tendencia a contar con sistemas de indicadores es cada vez más común, pese a no tener completamente claros los objetivos que se persiguen con los mismos, por lo que aumenta también el riesgo de que estos esfuerzos sean poco aprovechados (OCDE, 2002).

2. Clasificación de los indicadores. Marcos conceptuales.

Debido a que la información utilizada para construir indicadores es amplia y diversa, se requiere un marco conceptual que permita estructurar la información y facilitar su acceso e interpretación. Existen varios modelos para organizar los conjuntos de indicadores. Uno de los más conocidos –y quizá el más utilizado– es el denominado PSR (presión, estado, respuesta), propuesto por el Ministerio de Medio Ambiente de Canadá (Environment Canada) y la OCDE (OCDE, 2004).

Otro modelo es el DPSIR (Driving force, Pressure, State, Impact and Response), cuyas siglas en inglés significan factor determinante (fuerza directriz en algunos textos), presión, estado, impacto y respuesta, y que ha sido desarrollado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) para describir las interacciones entre la actividad humana y el medio ambiente. Se trata de una extensión del modelo PSR mencionado anteriormente.

A continuación se presenta una descripción de cada uno de ellos.

2.1. Esquema Presión-Estado-Respuesta (PSR).

El esquema PSR está basado en una lógica de causalidad: las actividades humanas ejercen presiones sobre el ambiente y cambian la calidad y cantidad de los recursos naturales (estado). Asimismo, la sociedad responde a estos cambios a través de políticas ambientales, económicas y sectoriales (respuestas). Este modelo parte de cuestionamientos simples:

- ¿Qué está afectando al ambiente?
- ¿Qué está pasando con el estado del ambiente?
- ¿Qué estamos haciendo por ello?

En este esquema de organización, los indicadores se clasifican en tres grupos: presión, estado y respuesta.



Figura 1: Esquema Presión – Estado – Respuesta para la clasificación de indicadores.

2.1.1. Indicadores de presión.

Representan las presiones que ejercen las actividades humanas sobre el ambiente y los recursos naturales. Un ejemplo de indicador de presión sobre la calidad del aire son las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

A menudo los indicadores de presión se clasifican a su vez en dos grupos: de presión directa o indirecta. Los primeros consideran las presiones directas sobre el ambiente, causadas por las acciones del ser humano, tales como las cantidades de residuos generados o las emisiones de tóxicos. Los segundos consideran las actividades humanas en sí mismas, es decir, las actividades productivas que generan la problemática; por ejemplo, la fabricación de automóviles. Estos últimos son útiles para precisar las acciones que deben aplicar los sectores causantes para revertir el problema.

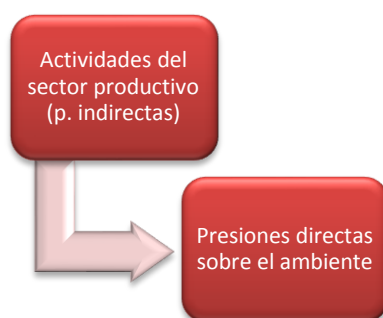


Figura 2: Presiones indirectas y presiones directas.

2.1.2. Indicadores de estado.

Se refieren, como su propio nombre indica, al estado del ambiente. A la cantidad y calidad de los recursos naturales. Ejemplos: la concentración de determinada sustancia en el agua o en el aire, la superficie cubierta por bosques, etc. Los indicadores de estado deben estar diseñados para dar información sobre la situación del ambiente y su evolución a través del tiempo.

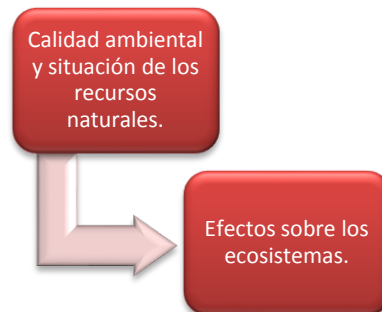


Figura 3: Estado del Medio Ambiente.

2.1.3. Indicadores de respuesta.

Muestran los esfuerzos realizados por la sociedad, por instituciones o por gobiernos para reducir o atenuar la degradación del ambiente. Las labores de respuesta están enfocadas hacia: i) la presión y ii) el estado. Un ejemplo cercano: el problema del sobrepeso. Una respuesta podría ser cambiar la dieta (respuesta a la presión), y otra podría ser comenzar un plan de ejercicio (respuesta dirigida al estado). Los indicadores de respuesta estudiarían los resultados de estas medidas tomadas.



Figura 4: Acciones de respuesta.

Puede ocurrir que algunos indicadores de respuesta sean también indicadores de estado. Por ejemplo, la superficie cubierta por áreas naturales protegidas ofrece una imagen de la voluntad para conservar el ambiente y, simultáneamente, facilita una idea de la situación del mismo.

Los indicadores de respuesta son más específicos que los anteriores, ya que describen situaciones más particulares. Es frecuente también que los indicadores de respuesta no tengan una naturaleza cuantitativa, por lo menos en principio. Por ejemplo, ante el deterioro de la capa de ozono, una respuesta es la firma o no de un compromiso para sujetar la producción y emisión de destructores de ozono, como el Protocolo de Montreal.

2.2. Esquema Factor determinante-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (DPSIR).

El modelo DPSIR (*Driving force, Pressure, State Impact, Response*), cuyas siglas significan factor determinante, presión, estado, impacto y respuesta, ha sido desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente para describir las interacciones entre la actividad humana y el medio ambiente. Se trata de una extensión del modelo PSR de la OCDE. A continuación se define brevemente cada uno de los elementos del modelo:

- ❖ Factor determinante: los indicadores de factor determinante describen las condiciones ambientales, sociales, demográficas y económicas que influyen significativamente las presiones sobre el medio ambiente (en otros modelos, presiones indirectas).
- ❖ Presiones: son las actividades humanas que causan o pueden causar problemas en el medio ambiente. Los indicadores de presión describen la emisión de sustancias contaminantes, y el uso de los recursos naturales.
- ❖ Estado: los indicadores de estado describen la situación de diversos aspectos del medio ambiente en un momento determinado. El estado depende, además de las condiciones naturales, de las presiones sobre el medio y de las medidas de protección del medio ambiente que se hayan implantado.
- ❖ Impacto: los indicadores de impacto muestran las consecuencias de los cambios en el estado del medio ambiente o en la población.
- ❖ Respuesta: los indicadores de respuesta reflejan las iniciativas de la sociedad y la administración para la mejora de los problemas medioambientales.

Este esquema muestra los fenómenos de manera más disgregada que el PSR, a costa de perder simplicidad. En términos generales, se puede emplear el marco DPSIR cuando el sistema de indicadores tiene como objetivo un conocimiento más profundo de los temas y mientras exista suficiente información.

En la siguiente página se puede observar una representación esquemática del funcionamiento de este modelo.

Funcionamiento del esquema DPSIR.



Figura 5: Esquema DPSIR. Factor determinante, presión, estado, impacto y respuesta.

Más adelante, en la sección 3.1, se estudia un ejemplo de la aplicación de este modelo en el mundo del agua, por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España (MARM). La información se encuentra disponible públicamente en la página web del Ministerio (<http://www.marm.es>).

3. Indicadores en el mundo del agua.

Se han visto con anterioridad las pautas para la elaboración adecuada de indicadores y los marcos de referencia en que pueden ser catalogados para una mejor comprensión. Sin embargo, es momento de enfocar. Como es bien sabido, los indicadores están por todas partes, y una de esas partes, de vital importancia para la vida, es el agua.

"El agua tiene el poder de mover a millones de personas. Desde el comienzo de la civilización humana, las personas se han asentado cerca del agua. La gente se mueve cuando hay poca, la gente se mueve cuando hay demasiada. La gente se mueve sobre ella. La gente escribe, canta, baila y sueña con ella. La gente lucha por ella. Y todo el mundo, en todas partes y todos los días, la necesita. Necesitamos agua para beber, para cocinar, para lavar, para la alimentación, para la industria, la energía, el transporte, para la diversión, para la vida. Y no solo nosotros los humanos la necesitamos, todo ser vivo depende del agua para su supervivencia".

Mijaíl Gorbachov.

Después de esta concienciadora sentencia acerca de la importancia del agua, puede procederse ya al abordaje del tema en cuestión: el uso actual de indicadores en el mundo del agua. Sirva para comenzar el ejemplo del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, que emplea el marco DPSIR, desarrollado en el capítulo previo.

3.1. Aplicación del modelo DPSIR por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Propósito del sistema de indicadores

El Sistema de Indicadores del agua es un conjunto de medidas clave que caracterizan el estado del medio acuático y la repercusión de la actividad humana sobre el mismo. Es parte de un esfuerzo de síntesis de la información más relevante contenida en los datos ambientales y socioeconómicos recogidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Resume en más de 40 variables los valores más destacados y que caracterizan mejor el estado y la evolución del medio. El esfuerzo del diseño y cálculo de estos indicadores va mucho más allá de su publicación, puesto que se trata de información que se utiliza en el proceso de gestión del agua. Sin embargo su publicación es clave para promover su conocimiento por parte de la sociedad y para fomentar su uso generalizado como herramienta de diagnóstico y seguimiento de las problemáticas principales del agua en España.

A quién va dirigido

Según indica el citado Ministerio en su página web, el público al que va dirigido es el siguiente:

- Ciudadanos interesados en conocer con más profundidad el estado del medio en España y comprender mejor la problemática del agua, su evolución y las medidas que toma la administración para gestionarlo.
- Usuarios más especializados del mundo del agua, españoles o extranjeros, que desean tener una visión de conjunto del estado del medio que les permita identificar rápidamente:
 - Las problemáticas más graves
 - La situación relativa de las demarcaciones en el conjunto del Estado
 - La evolución de los indicadores a lo largo del tiempo

El Sistema de Indicadores como parte del SIA

El Sistema Integrado de Información del Agua (SIA) es el sistema de referencia para el tratamiento de la información ambiental sobre el agua del Ministerio de Medio Ambiente. Se trata de un sistema que integra múltiples fuentes de datos de diversos organismos relacionados con la planificación y gestión hidrológica. El SIA posee un modelo de datos único que relaciona todas esas fuentes y permite disponer de una visión integrada de la información independientemente de dónde se encuentre almacenada.

Modelo de cálculo

El sistema de indicadores se nutre de datos del SIA, lo que permite que la información mostrada se corresponda con los últimos datos disponibles y provenga de fuentes validadas. Los datos originales disponibles para cada variable se agregan en la mayor parte de los casos para mostrar valores a escala nacional y de Comunidades Autónomas o de Demarcaciones Hidrográficas según el indicador de que se trate. Respecto a la escala temporal, la información se muestra a escala anual, y en algunos casos mensual; si la información de partida es más detallada, se realiza la agregación necesaria, que puede ser una suma o una media. La información se muestra mediante gráficos que comprenden todo el periodo de datos disponible para cada indicador.

Acceso al panel de control

El sistema de indicadores del agua pretende incluir los indicadores más relevantes para cada uno de los elementos del modelo DPSIR en lo referente al medio ambiente acuático e incluye tanto factores naturales como antrópicos.

La organización de los indicadores dentro del modelo puede observarse en la siguiente imagen. En este 'mapa de indicadores' cada indicador se encuentra en la zona considerada más apropiada, aunque realmente existen indicadores influenciados tanto por factores naturales como antrópicos, y, en último término la actividad humana influencia todas las variables ambientales.

Mapa de indicadores – FACTORES ANTRÓPICOS



 FACTOR DETERMINANTE	 PRESIÓN	 ESTADO	 IMPACTO	 RESPUESTA
FACTORES ANTRÓPICOS				
Densidad de población 92,92 hab/km2 ➡	Demandas de agua 29,28 hm3/a ➡	Aportación en ríos 15.673 hm3/a ➡	Objetivos medioamb. aguas superf.	Inversión en medidas de oferta 1.444,90 mill € ➡
Concentración de población	Dotaciones uso urbano 275 lit/hab/d ➡	Almacenamiento en embalses 35,67 mil. hm3 ➡	Objetivos medioamb. aguas subt.	Inversión en calidad del agua 496,59 mill € ➡
Noches de estancia turística 349.076 mil. ➡	Consumo fertilizantes agric. 92,40 kg/ha ➡	Índices de consumo y explotación ➡	Grado conformidad EDAR	Presas en activo 808 ➡
Superficie de cultivos 17.270 mil. ha ➡	Consumo fitosanitario 762,50 mill € ➡	Estado hidrológico Normalidad ➡		Capacidad de embalse 54,31 mil. hm3 ➡
Superficie de cultivos intensivos 473 mil. ha ➡		Contaminación orgánica (DBO5)		Volumen de agua reutilizada 368,20 hm3/a ➡
Cabezas de ganado 54.386 mil. ➡		Nitratos en acuíferos		Capacidad de desalación 3.383.841 m3/d ➡
VAB de la industria 147.905 mill € ➡				Eficiencia uso del agua urbano 78,01 % ➡
VAB industrias más contaminantes 40.636 mill € ➡				Precio del agua uso doméstico 1,20 €/m3 ➡
				Precio del agua uso industrial 1,53 €/m3 ➡
				Superficie de Red Natura 14.281 mil. ha ➡
FACTOR DETERMINANTE	PRESIÓN	ESTADO	IMPACTO	RESPUESTA

Figura 6: Mapa de indicadores: factores antrópicos. Ministerio de Medio Ambiente.

Mapa de indicadores – FACTORES NATURALES

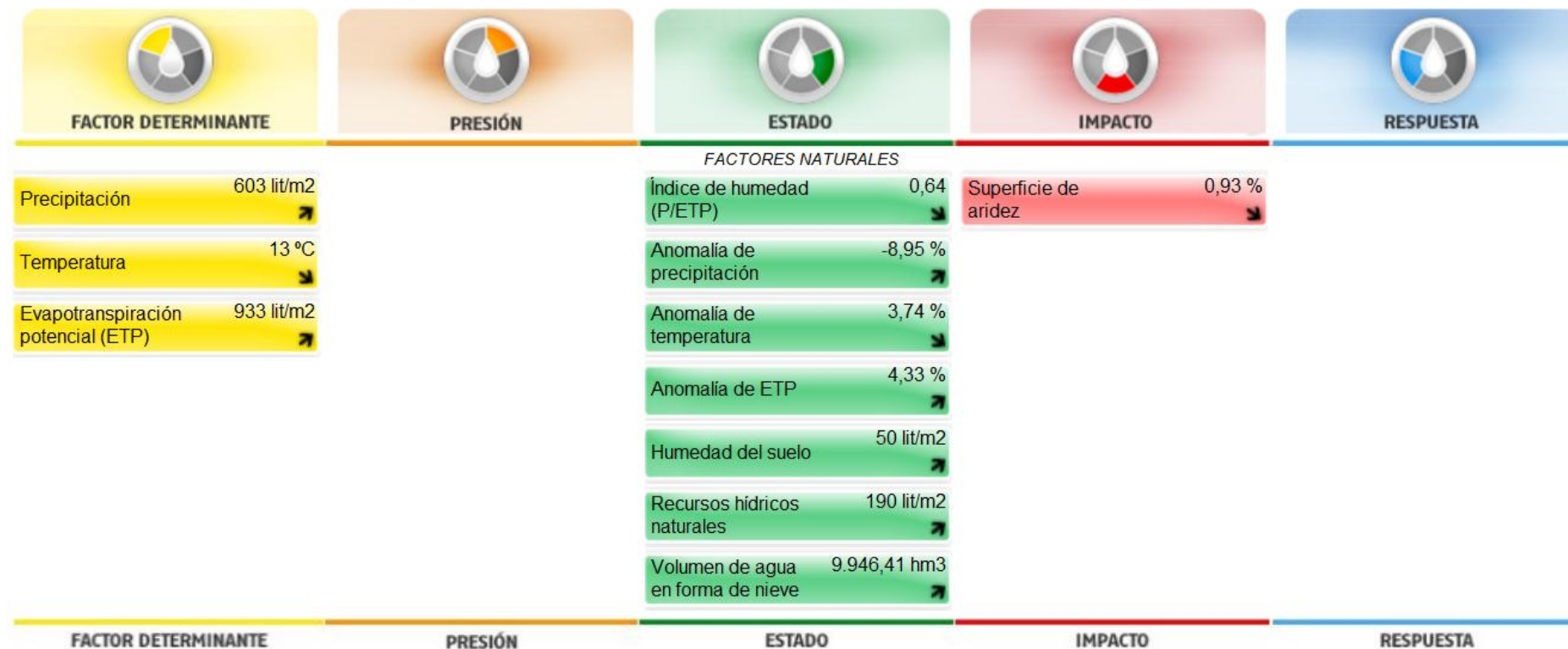


Figura 7: Mapa de indicadores: factores naturales. Ministerio de Medio Ambiente.

3.2. Elección del objeto de estudio. ¿Por qué el río Ebro?

Para ilustrar el marco teórico descrito anteriormente se ha elegido el río Ebro. Las razones que han conducido a esta elección son las siguientes:

1. Es el río más representativo de España, por su magnitud, (hablando tanto en términos de caudal como de longitud) y por la extensión de su cuenca, la mayor de la Península.
2. El valle del Ebro, junto con la costa Mediterránea de España y Francia, forman el segundo eje de futuro de Europa, contactando perpendicularmente con el eje del Rin (que recorre Europa de norte a sur desde el sur de Inglaterra hasta el norte de Italia a través del Rin).
3. La disponibilidad de datos es elevada, gracias a la Confederación Hidrográfica del Ebro, la primera institución creada en el mundo con el objetivo de gestionar toda una cuenca fluvial de manera unitaria; y cuya sede está en Zaragoza, donde se está llevando a cabo este trabajo.

En el siguiente capítulo se realiza una descripción del río Ebro y de su cuenca, de la Confederación Hidrográfica del Ebro y de los usos más importantes que se hacen del agua según la citada institución. Se finaliza explicando los diferentes sistemas de medida de parámetros que son empleados por la Confederación a lo largo y ancho de toda la cuenca, a fin de esclarecer cualquier tema, dar luz a toda cuestión y permitir la toma adecuada de decisiones bajo fundamentos en forma de datos.

4. El río Ebro.

El río Ebro es el segundo río más caudaloso de la Península Ibérica, por detrás del Duero; el segundo más largo de la Península, por detrás del Tajo; y el primero, tanto por longitud como por caudal, entre los que discurren enteramente por España.

Recorre el extremo nororiental de la Península Ibérica, a través del valle que lleva su nombre, situado en una depresión. Sigue una dirección noroeste-sureste desde su nacimiento en el Pico Tresmares en la Cordillera Cantábrica (aunque tradicionalmente se ha considerado Fontibre como su lugar de nacimiento), hasta el Mar Mediterráneo, en el que desemboca formando el Delta del Ebro.

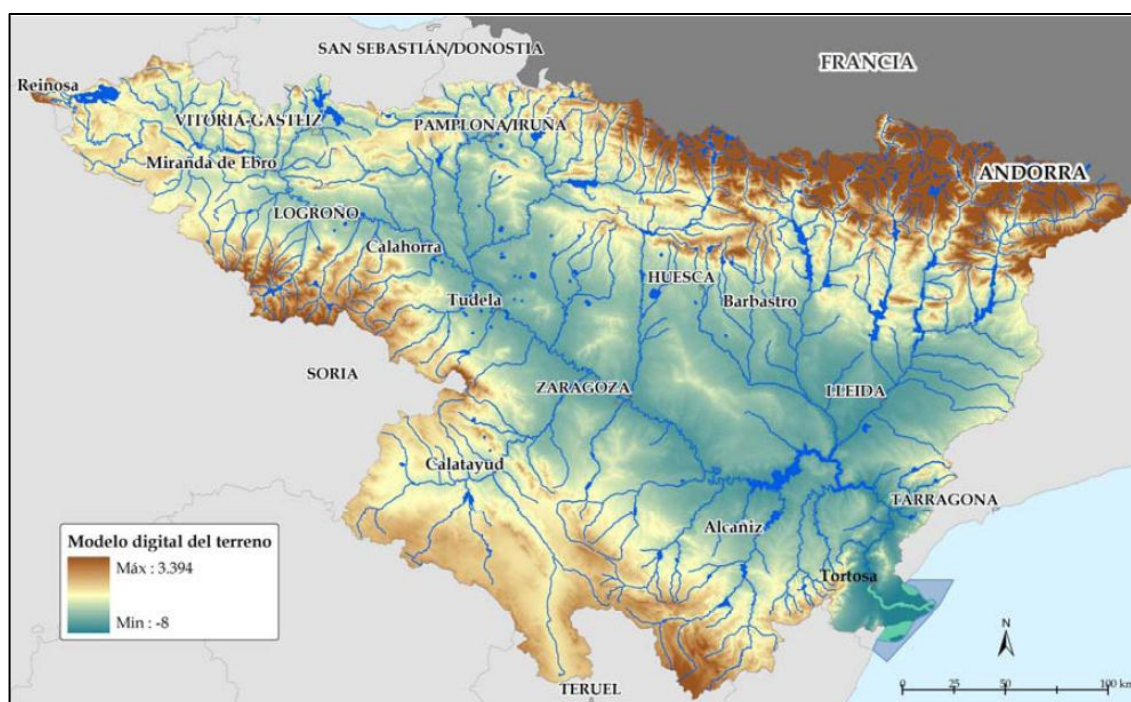


Figura 8: Cuenca del Ebro. Orografía.

El Ebro atraviesa las comunidades autónomas españolas de Cantabria (donde nace), Castilla y León, La Rioja, Navarra, Aragón y Cataluña (donde desemboca). Además, su cuenca hidrográfica también drena territorios del País Vasco, Castilla la Mancha y la Comunidad Valenciana. Dos capitales de comunidad autónoma, Logroño y Zaragoza, son bañadas por el río. Fuente: Gran Enciclopedia Aragonesa (GEA).

4.1. La cuenca.

Como ya se ha indicado, la Cuenca del Ebro se sitúa en el cuadrante NE de la Península Ibérica y ocupa una superficie total de 85.362 km², de los que 445 km² están en Andorra, 502 km² en Francia y el resto en España. Es la cuenca hidrográfica más extensa de España, representando el 17,3 % del territorio peninsular español. Sus límites naturales son: por el norte los montes Cantábricos y los Pirineos, por el sureste el Sistema Ibérico y por el este la cadena Costero-Catalana.

Está drenada por el río Ebro que, en su camino, recoge aguas procedentes de los Pirineos y montes Cantábricos por su margen izquierda, a través de importantes afluentes, como el Aragón, Gállego, Cinca-Segre, etc. y que por su margen derecha recibe los afluentes procedentes del Sistema Ibérico, normalmente menos caudalosos, como el Oja, Iregua, Jalón o Guadalope. En total se contabilizan unos 12.000 km de red fluvial principal, de los cuales, como se ha mencionado en el apartado anterior, 910 km pertenecen al cauce principal del Ebro.

En este amplio y variado territorio viven algo más de 3.000.000 habitantes, lo que supone una densidad de 35,3 hab/km², muy inferior a la media española (91,4 hab/km² [2008]). Alrededor de la mitad de la población se concentra en Zaragoza, Vitoria, Logroño, Pamplona, Huesca y Lleida.

- + Superficie: 85.362 km²
- + Ríos principales: 347
- + Longitud de los ríos: 12.000 km
- + Habitantes de la cuenca según padrón de 1998: 2.767.103
- + Aportación superficial anual estimada al régimen natural en el periodo 1940/41 a 1985/86:
 - Máxima: 29.726 hm³/año
 - Media: 18.217 hm³/año
 - Mínima: 8.393 hm³/año

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro (C. H. del Ebro).

4.2. La Confederación Hidrográfica del Ebro.

La Confederación Hidrográfica del Ebro es el Organismo de Cuenca más antiguo del mundo (1926) (C. H. del Ebro, 2008).

En un principio, el objetivo fundamental fue la creación de regadíos como garantía de alimentación en un país diezmado por las hambrunas ante las recurrentes sequías. Más adelante, el desarrollo industrial condujo al fomento de la producción hidroeléctrica. Durante las décadas de los años sesenta y setenta a las Confederaciones se les puso como meta la gestión del agua para mejorar la calidad de vida. Durante esa época se construyeron innumerables abastecimientos y saneamientos de poblaciones.

Las últimas décadas han estado marcadas por una mayor complejidad en la gestión del agua, en el marco de una España descentralizada y con la ayuda de sofisticados sistemas de información hidrológica y de prevención de contaminación. El reto actual es dar cumplimiento a la DMA (Directiva Marco del Agua), lo que comporta alcanzar el buen estado ecológico de las aguas en el año 2015, a la vez que se satisfacen de forma mucho más eficiente las demandas de agua.

En el ámbito de actuación de la Confederación Hidrográfica del Ebro están incluidas las partes españolas de las cuencas del Ebro y del Garona, además de la cuenca endorreica de Gallocanta. Este territorio ocupa una superficie total de 85.534 km², repartidos en 9 Comunidades Autónomas (18 Provincias).

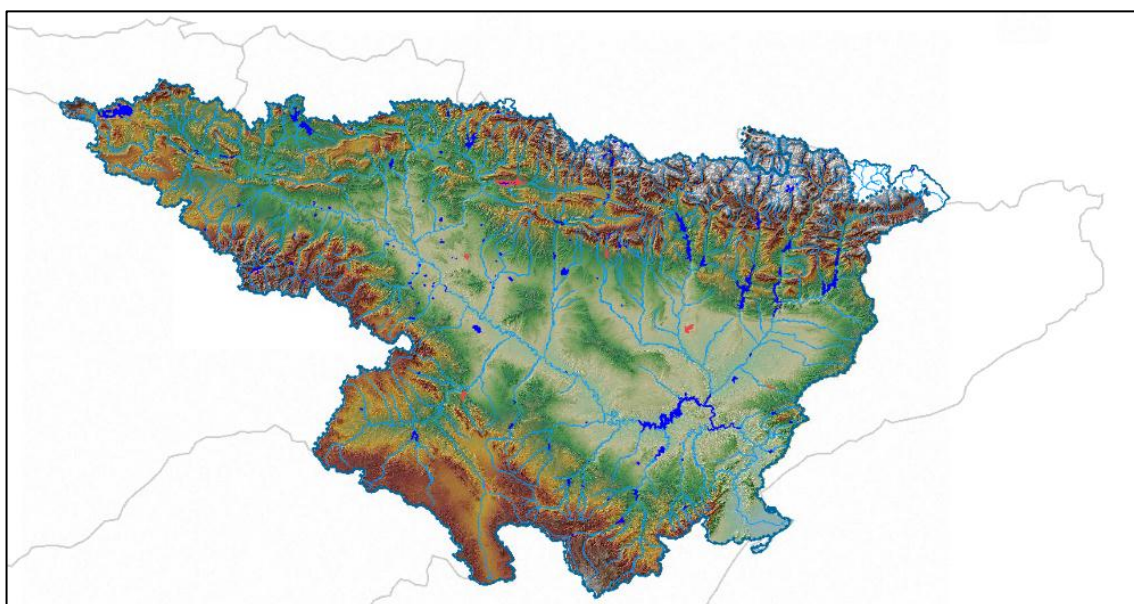


Figura 9: Territorio que comprende la Confederación Hidrográfica del Ebro.

4.3. Usos del agua.

Cada uso que se da al agua requiere una calidad distinta de este recurso y recibe por ello un tratamiento diferente, tanto antes como después de su utilización. Los usos del agua suelen distinguirse en tres grandes grupos: agrícola, industrial y urbano (C.H. del Ebro, 2010).

El uso agrícola es aquel en que el agua es destinada al riego de las cosechas. Es el que mayor cantidad consume y el que menos calidad exige entre los tres grandes grupos. El agua se lleva directamente desde los embalses o ríos hasta balsas de riego o, a través de canales agrícolas, a los puntos de distribución de las diversas fincas.

El uso industrial es el que cubre las demandas de la industria y las centrales hidroeléctricas. La mayoría del agua usada de esta forma retorna a su cauce, muy poca es consumida. Por otra parte, debido al elevadísimo número de instalaciones industriales y a que una buena parte de ellas se abastece a partir de las redes urbanas, su estudio es sumamente complejo y por ello no se encuentra bien caracterizada.

El uso urbano comprende el abastecimiento a la población: consumo doméstico; servicios públicos (tales como el riego de zonas verdes, la limpieza de las calles y el consumo en instalaciones públicas, como los centros educativos y los polideportivos); y el suministro a industrias dependientes de la red urbana. Requiere una mejor calidad que los anteriores usos, pues debe ser potable y cumplir estrictas normas de control de calidad. Por ello, desde las captaciones (aguas superficiales -embalses, ríos, canales- o aguas subterráneas) se canaliza hasta una estación potabilizadora, en la que se somete a tratamiento que la desinfecta (con compuestos de cloro y otros productos químicos) y elimina los sólidos que contenga. Al final, se realizan controles sanitarios para garantizar su potabilidad.

En este capítulo se desglosan los diferentes usos del agua dentro de la Demarcación Hidrográfica del Ebro, pero antes de ello, véanse en la página siguiente algunos datos del uso del agua en España.

Estos son datos que ofrece Aquastat (FAO) acerca de los usos del agua en España:

 Base de datos - Consulta	
▼ España	
	2008
Extracción de agua agrícola (10^9 m ³ /año)	19.64
Extracción de agua municipal (10^9 m ³ /año)	5.765
Extracción de agua industrial (10^9 m ³ /año)	7.056
Extracción total de agua (suma de sectores) (10^9 m ³ /año)	32.46
Extracción de agua agrícola como % de extracción total (%)	60.51
Extracción de agua municipal como % de extracción total (%)	17.76
Extracción de agua industrial como % de extracción total (%)	21.74
Extracción total de agua per cápita (m ³ /hab/año)	729.7
Extracción de agua municipal per cápita (m ³ /hab/año)	129.6

Figura 10: Usos del agua en España (según Aquastat).

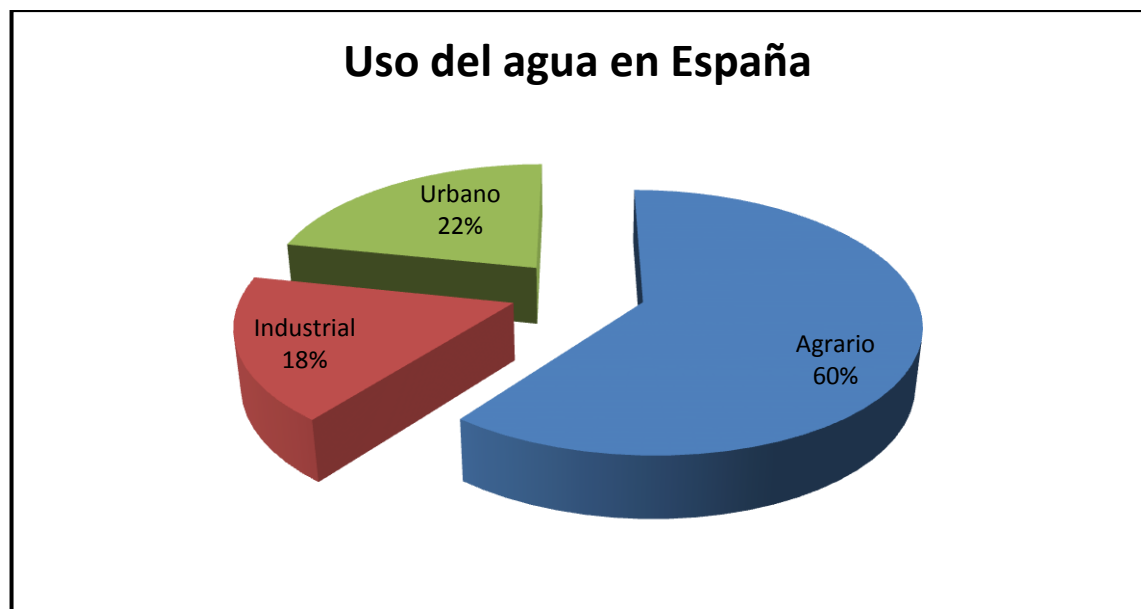


Figura 11: Gráfico sectorial. Porcentajes de los principales usos consuntivos del agua en España (FAO).

4.3.1. Abastecimiento de la población.

El abastecimiento de población comprende el uso doméstico, la provisión a servicios públicos locales e institucionales y el servicio de agua para los comercios, industrias e instalaciones ganaderas ubicadas en el ámbito municipal que se encuentran conectadas a la red de suministro.

La demanda total de agua para consumo doméstico en la demarcación se estima en 359 hm³ anuales (sin incluir la transferencia al exterior de 135 hm³), con una dotación unitaria promedio de 319 litros diarios por habitante permanente. En esta dotación están incorporadas las diversas fracciones de consumo: población residente, población estacional, industria conectada y comercio, usos municipales y otros, y, finalmente, pérdidas y consumos no registrados (C.H. del Ebro, 2010).

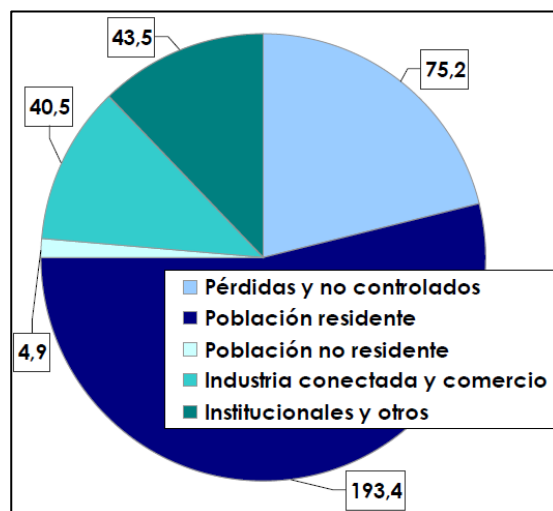


Figura 12: Desagregación del consumo de abastecimiento (hm³/año).

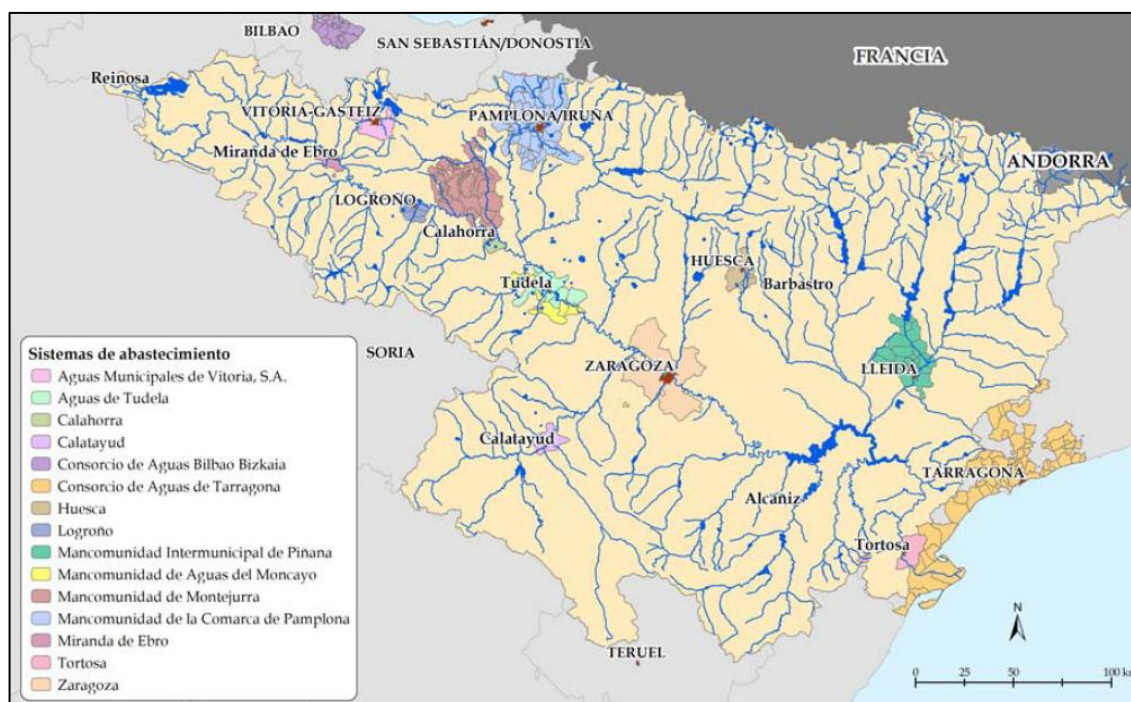


Figura 13: Sistemas de abastecimiento de más de 20.000 habitantes.

4.3.2. Aprovechamientos agrarios.

El complejo agroalimentario (agricultura, ganadería e industria de la alimentación) constituye el segundo eje productivo del Valle del Ebro, tras el complejo metalúrgico y de transportes.

La demanda se evalúa en 7.623 hm^3 anuales, si bien el caudal medio de agua suministrado varía cada año. En cuanto al subsector de la ganadería, la cabaña ganadera se aproxima a las 61.000.000 cabezas, sin embargo, la demanda de agua no resulta significativa, estimándose en $57 \text{ hm}^3/\text{año}$. En conjunto, las actividades agrarias suponen el 93,8 % de la demanda consuntiva de la demarcación (C.H. del Ebro, 2010).

Censo agrario de 1999 (C. H. del Ebro):

- Superficie de regadío: 682.359 ha
- Origen de las aguas:
 - Aguas superficiales: 91%
 - Aguas subterráneas: 8%
- Método de riego:
 - Por gravedad (pie, manta, etc.): 69%
 - Aspersión: 19%
 - Localizado (goteo, microaspersión, etc.): 12%

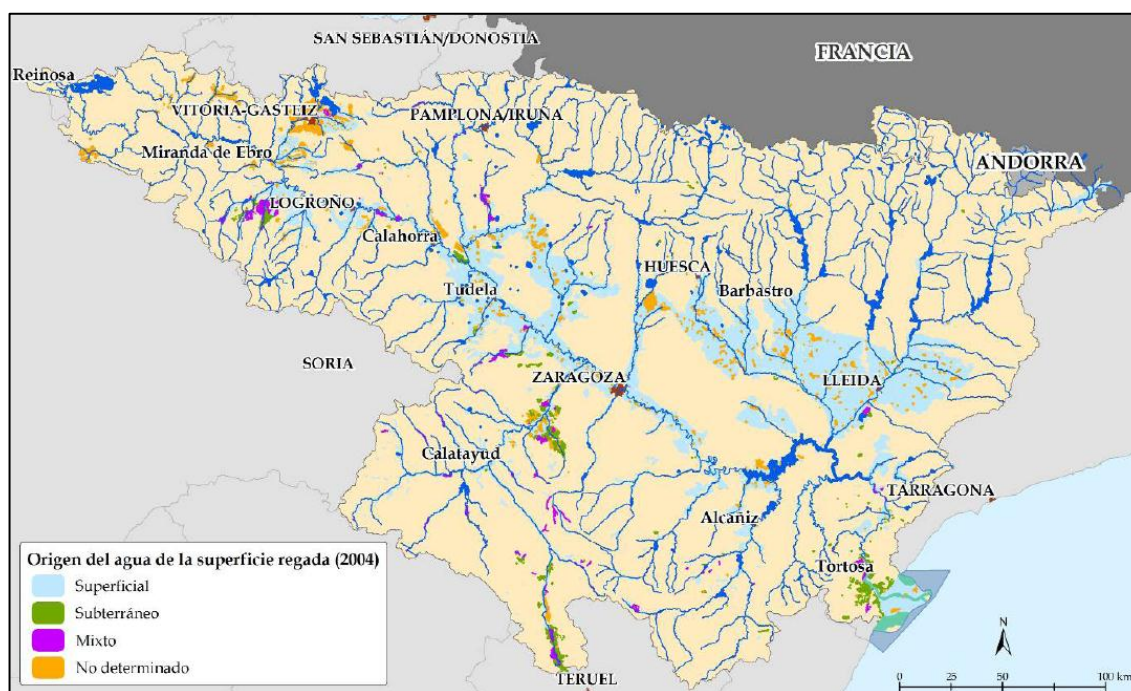


Figura 14: Superficie dedicada al regadío en la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

4.3.3. Usos industriales no energéticos

Los usos industriales comprenden las actividades de la industria manufacturera, excluyendo las actividades extractivas energéticas y relativas a la construcción. Si bien la demanda de agua para uso industrial servida por las redes de abastecimiento urbano ya está contemplada en el abastecimiento de población, en este punto se incluye todo el volumen de consumo industrial, tanto conectado a la red municipal como a partir de recursos propios.

La demanda de la industria manufacturera asciende a 249 hm³/año, lo que representa un 3% de la demanda consuntiva total de agua en la Demarcación.

Si se realiza un análisis subsectorial de la demanda industrial manufacturera se desprende que la actividad que más agua requiere es la correspondiente a la metalurgia y productos metálicos (79 hm³/año), seguido de la industria del papel (43 hm³/año), el sector de alimentación, bebidas y tabaco (41 hm³/año) y la industria química y farmacéutica (36 hm³/año) (C.H. del Ebro, 2010).

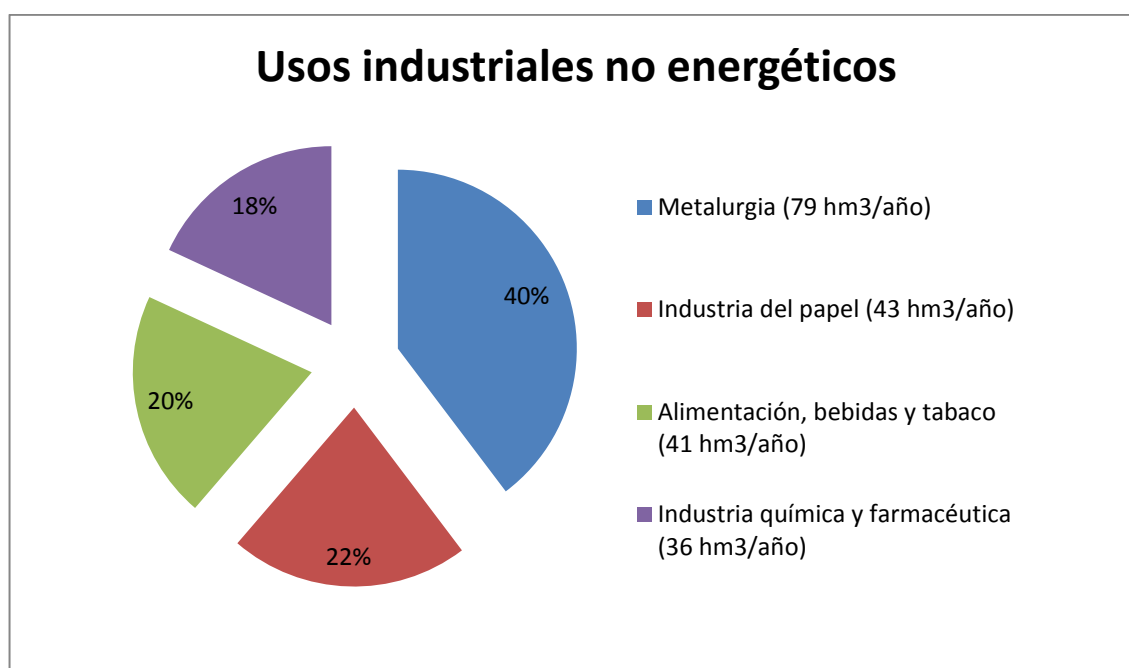


Figura 15: Gráfico sectorial: usos del agua en la industria manufacturera.

4.3.4. Usos energéticos.

La demarcación del Ebro cuenta con una potencia instalada de 11.500 MW, sin considerar las energías alternativas, capacidad que corresponde en un 34% a la producción hidroeléctrica, un 44% a la producción térmica, y un 22% restante de origen nuclear. En términos de contribución a la capacidad de generación nacional, en la cuenca del Ebro se produce el 32% de la energía nuclear, el 21% de la energía hidráulica y el 11% de la energía térmica convencional. La cuenca del Ebro presenta un notable desarrollo hidroeléctrico, tanto por número de saltos hidroeléctricos (458 agrupados en 360 centrales), como por la potencia instalada (3.894,5 MW). El uso estrictamente hidroeléctrico viene a suponer la utilización de unos 38.000 hm³/año de agua, con lo que se obtiene una producción del orden de los 9.400 GWh. Considerando la aportación media en régimen natural, la producción unitaria que se obtiene (0,5 kWh/m³) es la mayor de todas las cuencas españolas. La producción hidroeléctrica del Ebro es fundamental y de importancia estratégica para el mantenimiento de la potencia-frecuencia de la red en el nordeste de España. La capacidad hidroeléctrica se concentra en las cuencas de la margen derecha -fundamentalmente en el Segre y sus afluentes (Cinca, Ésera y Nogueras)- y en el sistema de embalses del bajo Ebro: Mequinenza–Ribarroja–Flix que albergan las tres centrales más productivas de la cuenca (C.H. del Ebro, 2010).

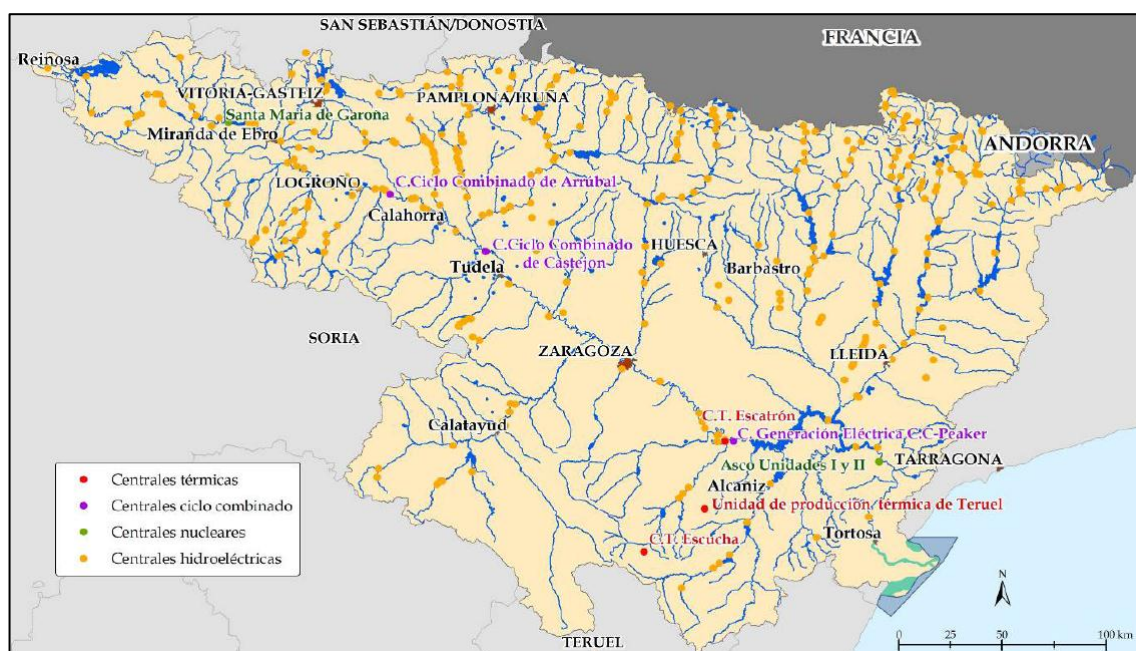


Figura 16: Centrales en la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

Centrales térmicas

Por otro lado, las principales demandas de agua dulce para refrigeración en España se localizan en las centrales nucleares de la cuenca del Ebro, con una potencia instalada de 5.430 MW: Ascó (2.270 hm³/año) y Sta. M^a de Garoña (766 hm³/año); ambas tienen riesgo de no satisfacer las demandas e imponen rigidez a la explotación de los caudales del Ebro. Las centrales de ciclo combinado, con una potencia instalada que alcanza los 3.877 MW, se han ubicado en Arrúbal, Castejón, Castelnou y Escatrón, aunque existen varios emplazamientos solicitados a lo largo del Ebro, y superan en potencia instalada a las térmicas clásicas de Teruel (1.050 MW) y Escucha (160 MW). Por otra parte, en los ciclos combinados el consumo de agua resulta una media de 200 l/s por grupo de 400 MW, de los cuales un 60% se evapora y un 40% retorna al cauce fluvial (C.H. del Ebro, 2010).

Resumen de los aprovechamientos energéticos:

<u>Toda la cuenca:</u>	Nº	Potencia (MW)	Produc. (GWh/año)
Centrales hidroeléctricas	330	3874	6500
Centrales térmicas de carbón	3	1290	7600
Centrales térmicas de gas	3	2300	9500
Centrales nucleares	3	2421	18400
Parques eólicos	200	5500	7000

Tabla 1: Aprovechamientos energéticos en toda la cuenca del Ebro. Potencia instalada y producción.

Cauce principal:

Nº DE C. HIDROELÉCT: 55	POTENCIA (MW)	CAUDAL (m3/s)	PRODUCCIÓN (GWh/año)
TOTAL	865,01	6495,56	1935,12

Tabla 2: Aprovechamientos energéticos en el cauce principal del Ebro. Potencia instalada y producción.

Fuente: C. H. del Ebro.

4.4. El sistema SAIH, las redes de estaciones SAICA y CEMAS. Medición de parámetros a lo largo del cauce.

A lo largo y ancho de toda la cuenca se encuentran situadas estaciones de diversas redes que sirven para medir multitud de parámetros, de cara a un conocimiento lo más pleno posible acerca del comportamiento del río y de su estado.

Algunas están enfocadas a la obtención de parámetros cuantitativos, y otras son en la práctica como laboratorios en los que se analiza la calidad del agua. Son las herramientas de las que se sirve la Confederación Hidrográfica del Ebro para elaborar informes detallados acerca de la situación del río en todo momento. Y son el medio por el que obtener los datos necesarios para la elaboración de este trabajo. A continuación, la explicación de cada una de ellas.

4.4.1. Midiendo la cantidad: el SAIH

El SAIH es el Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro.

Es un sistema de información encargado de captar, transmitir en tiempo real, procesar y presentar aquellos datos que describen el estado hidrológico e hidráulico de la cuenca, incluyendo, por tanto, el conocimiento del régimen hídrico a lo largo de su red fluvial y el estado de las obras hidráulicas principales y de los dispositivos de control que en ellas se ubican. Como tal sistema de información se apoya en una red de comunicaciones, y como elementos inteligentes de la misma, utiliza sistemas de adquisición y procesado de datos.

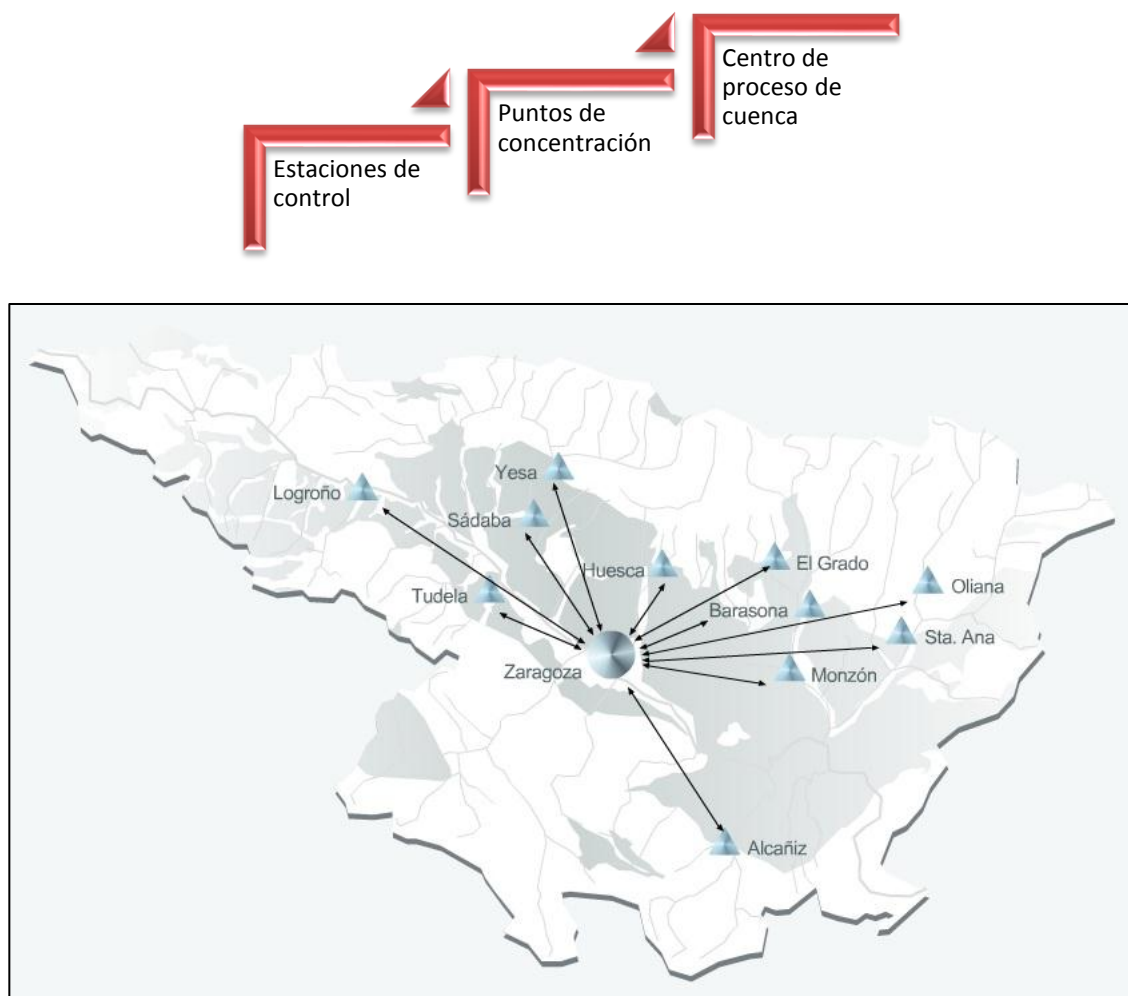


Figura 17: SAIH. Sistema Automático de Información Hidrológica.

Figura esquemática representativa del funcionamiento del SAIH. Los “puntos de concentración”, representados por triángulos en la figura recogen la información de las “estaciones de control” de sus alrededores y se la hacen llegar al “centro de proceso de cuenca”, representado por un círculo en la figura.

4.4.2. Midiendo la calidad: redes de estaciones CEMAS y SAICA.

Red de estaciones SAICA

En la cuenca existe una serie de puntos en los cuales el riesgo de producirse fenómenos de alteración de la calidad es mayor (por vertidos de aguas residuales, fundamentalmente), o bien se trata de masas de agua que exigen un mayor control en razón del uso a que se destinan (captaciones de agua potable, sobre todo). Para llevar a cabo esos controles está implantada la Red de alerta, conocida como red SAICA (Servicio Automático de Información de Calidad del Agua). Está constituida por una serie de instalaciones desasistidas que informan en continuo a un Centro de Control. En las estaciones se miden en continuo parámetros como la turbidez del agua, la temperatura, la conductividad, el pH, el oxígeno disuelto, el amonio, y en algunas estaciones también los nitratos y los cloruros.

Red de estaciones CEMAS

A diferencia de la red SAICA, cuyas medidas son continuas y en tiempo real, las estaciones de la red CEMAS (Calidad y Estado de las Masas de Agua Superficiales) son de muestreo puntual sobre una red de puntos fijos, en los que se efectúan medidas in situ y determinaciones analíticas. Se miden muchos más parámetros que en las estaciones de la red anterior, con una frecuencia mensual o trimestral.



Figura 18: Red CEMAS. Control de Estado de las Masas de Agua Superficiales.

5. Propuesta de nuevos indicadores: exergía, perfil exergético y coste exergético.

En el presente capítulo se procede a la explicación de los diferentes conceptos de exergía, exergoecología, coste exergético, Hidronomía Física y la Directiva Marco del Agua. Después se desglosa la ecuación general de la exergía del río en sus diferentes términos dando explicación a cada uno de ellos.

Habiendo sentado las bases teóricas, se procede al estudio de los datos obtenidos para el cauce del Ebro, comprobando la viabilidad de la aplicación de los nuevos indicadores que se proponen.

5.1. Definiciones.

A continuación se explican las nociones básicas necesarias para el entendimiento de este tema.

Índice de definiciones:

- 5.1.1. Exergía. Generalidades.
- 5.1.2. Exergoecología.
- 5.1.3. Estados ecológicos de los ecosistemas.
- 5.1.4. Coste exergético.
- 5.1.5. Hidronomía Física.
- 5.1.6. Directiva Marco del Agua.

5.1.1. Exergía. Generalidades.

En termodinámica, la exergía de un sistema es el máximo trabajo útil teórico que se puede obtener durante un proceso que conduzca a dicho sistema al equilibrio con el entorno. Si los límites del entorno se amplían lo suficiente, el entorno es el ambiente. Dicho de otro modo, la exergía es la energía susceptible de ser utilizada. Cuando el sistema y sus alrededores alcanzan el estado de equilibrio, la exergía es nula; y a éste se le denomina estado muerto.

La energía nunca se destruye en los procesos, solo cambia de forma (*1ª Ley de la Termodinámica*). En cambio, la exergía da cuenta de la irreversibilidad de un proceso debida al incremento de entropía (*2ª Ley de la Termodinámica*). La exergía se destruye en todo proceso que implique un cambio de temperatura, y esta destrucción es proporcional al incremento de entropía del universo. En los procesos isotermos reversibles, los términos exergía y energía son intercambiables y no hay generación de entropía.

La exergía es una propiedad de la combinación del sistema y su entorno porque, a diferencia de la energía, depende del estado de ambos. No tiene sentido hablar de exergía de un sistema sin tener definido un entorno.

A la luz de estas nociones, ha de quedar claro que la definición tradicional de la energía como la “capacidad para efectuar trabajo” no es cierta, pues rigurosamente esta propiedad es inherente a la exergía, y no a la energía.

5.1.2. Exergoecología.

La exergoecología (Valero, 1998) es la aplicación del análisis de exergía para la evaluación de los recursos naturales en la tierra. El consumo de los recursos naturales implica dispersión y destrucción de la organización, lo que se traduce en pérdida de exergía (generación de entropía). Por ello, el análisis de exergía describe perfectamente la degradación del capital natural.

El valor termodinámico de un recurso natural se define como el mínimo de trabajo (exergía) necesario para producir dicho recurso a partir de las sustancias tal y como se encuentran (concentración y distribución) en el entorno de referencia.

Por lo tanto, la exergía da cuenta de las características físicas concretas que hacen valiosos a los recursos naturales: unas características físicas diferentes de las del entorno, una composición particular que les diferencia del medio ambiente circundante, una localización privilegiada... Por lo tanto, la cuantificación del capital natural en términos de exergía es más rigurosa, coherente y global que en términos de masa o de dinero.

5.1.3. Estados ecológicos de los ecosistemas.

Entre el “estado natural” (sin intervención humana) y el “estado cero” (máxima degradación), existen diversos estados intermedios, como el “estado de explotación” (situación en régimen de explotación no regulada, sin medidas correctoras del impacto ambiental), el “estado actual” (situación observable como resultado de la aplicación efectiva de medidas correctoras), el “estado legal” (situación que correspondería al total cumplimiento de la normativa ambiental) y el “estado objetivo” (situación fijada por consenso (situación correspondiente a la aspiración social de calidad ambiental) (Directiva 2000/60/CE, 2000) (Directiva Marco del Agua).



Figura 19: Estado ecológico de un ecosistema, desde el estado natural al estado cero.

Más adelante, se estudiarán los estados natural, actual y objetivo del río Ebro, con objeto de compararlos para establecer conclusiones sobre la influencia del ser humano, sobre las pretensiones de las políticas establecidas y sobre el coste de llevar a cabo esas políticas.

5.1.4. Coste exergético.

La exergía representa un mínimo teórico. Sin embargo, los procesos reales están lejos de las condiciones ideales para la reversibilidad. En la práctica, la energía para obtener un recurso es siempre mayor que la dictada por la teoría. Por esta razón, no es correcto evaluar los recursos naturales únicamente en términos de procesos reversibles, ya que así se ignorarían los límites tecnológicos, mucho más costosos para el hombre desde el punto de vista físico. Por lo tanto, se debe incluir el coste real de la unidad física en la evaluación termodinámica de los recursos.

El coste exergético se define como la relación entre la energía invertida en el proceso real de la obtención del recurso y la energía mínima necesaria si el proceso fuera reversible. El coste exergético mide el número de unidades de exergía necesaria para obtener una unidad de exergía del producto (The Exergoecology Portal).

5.1.5. Hidronomía Física.

El ciclo del agua se rige por las leyes de la termodinámica. Por lo tanto, la termodinámica (más concretamente, la exergoecología) puede ayudar a construir una sólida estructura de costes basada estrictamente en la física y lejos de políticas de precios o subjetividades.

Cualquier tipo de degradación de las masas de agua a lo largo de ríos, lagos, etc., puede ser cuantificada. Por otra parte, la información física de los recursos se puede unificar en unidades universales (unidades de energía), y la conversión monetaria de los costes de exergía es automática a través de precios convencionales de energía. Esta nueva área de investigación, llamada "Hidronomía Física", puede constituir una guía para evaluar los costes ambientales incluidos en la Directiva Marco del Agua (DMA).

Ley Fundamental de la Hidronomía Física: perfil exergético ideal de un río:

$$\text{Exergía Absoluta (kW)} = \text{Exergía Específica (kJ/kg)} * \text{Flujo Másico (kg/s)}$$

La exergía específica es máxima en el nacimiento del río, puesto que la altitud es máxima así como su calidad y pureza. En su camino hacia la desembocadura, el agua desciende de altura y pierde calidad, lo que hace que disminuya la exergía específica hasta alcanzar valor nulo al unirse al agua del mar.

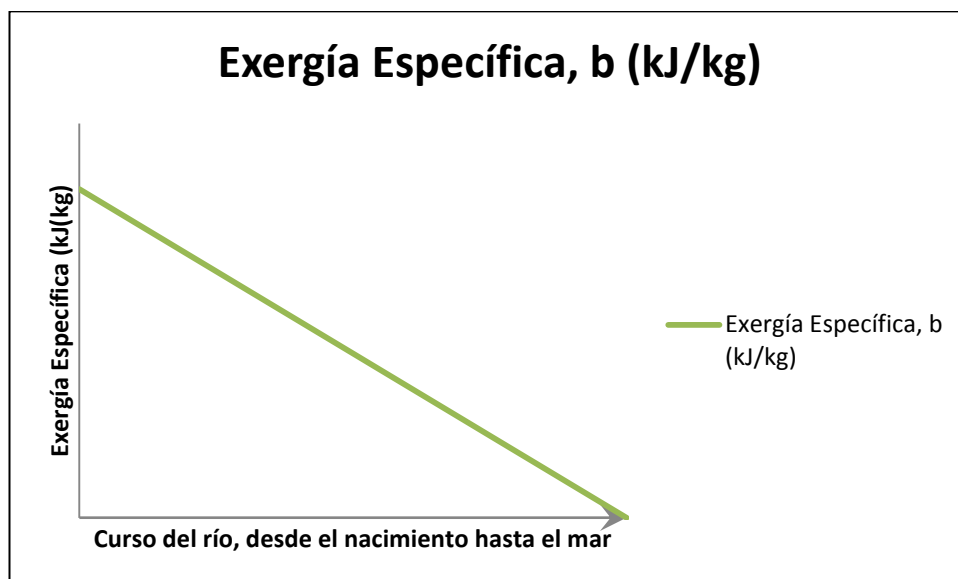


Figura 20: Variación de la exergía específica a lo largo del cauce de un río.

El caudal -o flujo másico, sin más que relacionarlos mediante la densidad- aumenta desde el nacimiento del río hasta la desembocadura, debido a las aportaciones de los sucesivos afluentes. De modo que el caudal es el máximo posible en la desembocadura.

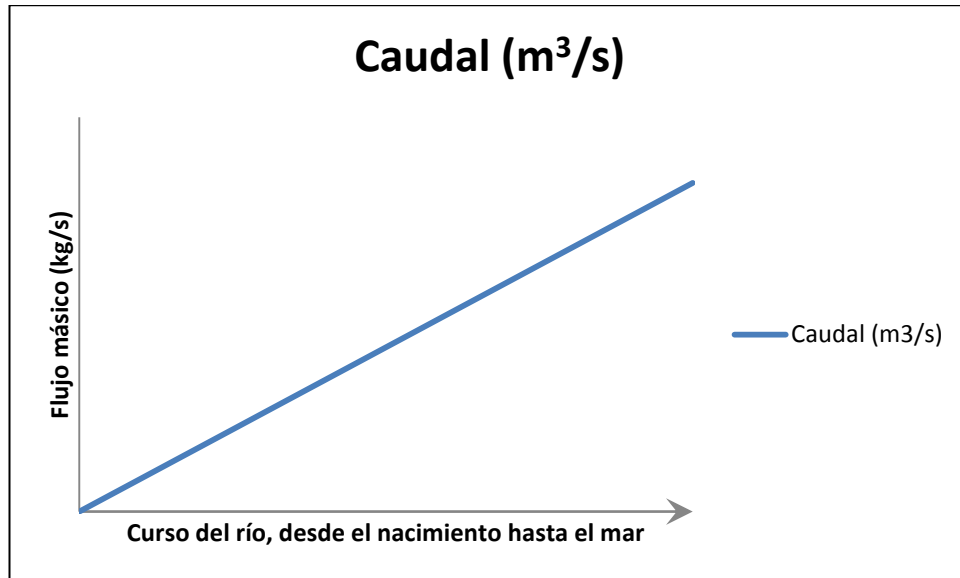


Figura 21: Variación del caudal a lo largo del cauce de un río.

Por último, multiplicando la exergía específica por el caudal se obtiene la exergía total del río que, a lo largo del curso del mismo tiene la forma que se muestra en la Figura 22:

$$B \text{ (kW)} = b \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) * \dot{m}(\text{kg/s})$$

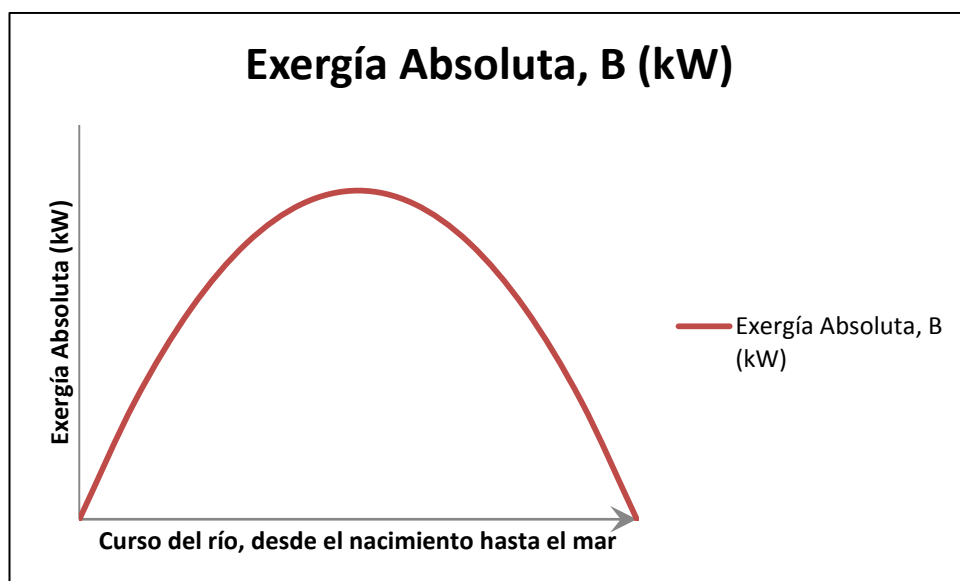


Figura 22: Variación de la exergía absoluta a lo largo del cauce de un río.

Y se concluye que la exergía absoluta en el nacimiento es igual a la exergía absoluta en la desembocadura, y en ambos casos es cero. Éste es el principio fundamental de la Hidronomía Física (The Exergoecology Portal).

5.1.6. Directiva Marco del Agua.

La Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, en adelante Directiva Marco del Agua, o simplemente DMA, tiene por objeto establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas que (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2000):

a) prevenga todo deterioro adicional y proteja y mejore el estado de los ecosistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos;

b) promueva un uso sostenible del agua basado en la protección a largo plazo de los recursos hídricos disponibles;

c) tenga por objeto una mayor protección y mejora del medio acuático, entre otras formas mediante medidas específicas de reducción progresiva de los vertidos, las emisiones y las pérdidas de sustancias prioritarias, y mediante la interrupción o la supresión gradual de los vertidos, las emisiones y las pérdidas de sustancias peligrosas prioritarias;

d) garantice la reducción progresiva de la contaminación del agua subterránea y evite nuevas contaminaciones; y

e) contribuya a paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

5.2. Ecuación general de la exergía aplicada al río Ebro.

La exergía de un río está definida por su flujo másico y por seis parámetros que caracterizan la condición del agua: temperatura, presión, altitud, velocidad, composición y concentración (Zaleta-Aguilar, Ranz, & Valero, 1998). Cada uno de estos parámetros está asociado a los diferentes componentes de la exergía: térmico, mecánico, potencial, cinético y químico (formación y concentración).

A partir de esto, es posible evaluar el río en términos cuantitativos (caudal) y cualitativos (exergía específica) y caracterizarlo en función de lo anterior (Wall, 1986).

Se ha comentado con anterioridad que la exergía no es una propiedad propia de un sistema aislado, sino de un sistema en relación a su entorno. El siguiente paso es definir un ambiente de referencia estable, y éste no es otro que el estado del mar en que desemboca el río (estado muerto, exergía nula, indicado con subíndice 0 en adelante).

Por último, se asume la aproximación de líquido incompresible¹ (válida para el caso del agua de un río), y es posible calcular la exergía como sigue:

Exergía total $_{(0)} = E. \text{ Térmica }_{(1)} + E. \text{ Mecánica }_{(2)} + E. \text{ Potencial }_{(3)} + E. \text{ Cinética }_{(4)}$
 + E. Química de formación $_{(5)} + E. \text{ Química de concentración }_{(6)}$

$$\begin{aligned} \left[\left[b_{H_2O} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \right] \right]_{(0)} = & \left[\left[c_{p,H_2O} \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \right] \right]_{(1)} + \left[\left[v_{H_2O} (p - p_0) \right] \right]_{(2)} \\ & + \left[\left[g(z - z_0) \right] \right]_{(3)} + \left[\left[\frac{1}{2} \left(\frac{C^2 - C_0^2}{1000} \right) \right] \right]_{(4)} \\ & + \left[\left[\left[\sum_i y_i \left(\Delta G_{f_i} + \sum_e n_e b_{ch,n_e} \right) \right] \right]_{i,p} \right]_{(5)} + \left[\left[RT_0 \sum_i x_i \ln \left(\frac{a_i}{a_0} \right) \right] \right]_{(6)} \end{aligned}$$

Ecuación 1: Exergía específica del agua de un río.

¹ El MSI (Modelo de Sustancia Incompresible) admite las siguientes aproximaciones:

- $v \approx v_0$
- $s - s_0 = c \ln \frac{T}{T_0}$
- $u - u_0 = c \Delta T = c (T - T_0)$

Cada componente se debe calcular por separado. La suma de todos los componentes corresponde a la exergía del río, y se entiende como el mínimo de energía que sería necesario para restaurar el río desde el estado de referencia. Cada uno de los componentes de la ecuación anterior se explica en las siguientes secciones. Todas las unidades están dadas así intencionadamente para la obtención de los resultados de exergía en kJ/kg.

5.2.1. Exergía térmica.

La exergía térmica depende del calor específico de la solución -que puede aproximarse, en el caso de ríos y lagos, al del agua pura $c_{p,H_2O} = 4,184 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ (Perry & Green, 1997)- y de las temperaturas absolutas del sistema T y del entorno de referencia T_0 :

$$b_t = c_{p,H_2O} \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right]$$

Ecuación 2: Exergía térmica del agua de un río.

Este término puede tener cierto valor representativo en algunos casos tales como sistemas de enfriamiento o usos recreativos como los baños térmicos.

A continuación, un ejemplo de la evolución de la exergía térmica en función de la temperatura. Se ha tomado temperatura de referencia $T_0 = 288 \text{ K}$. Puede observarse un mínimo en la gráfica, justamente cuando la temperatura del agua del río coincide con la temperatura de referencia, caso en que la exergía térmica es nula.

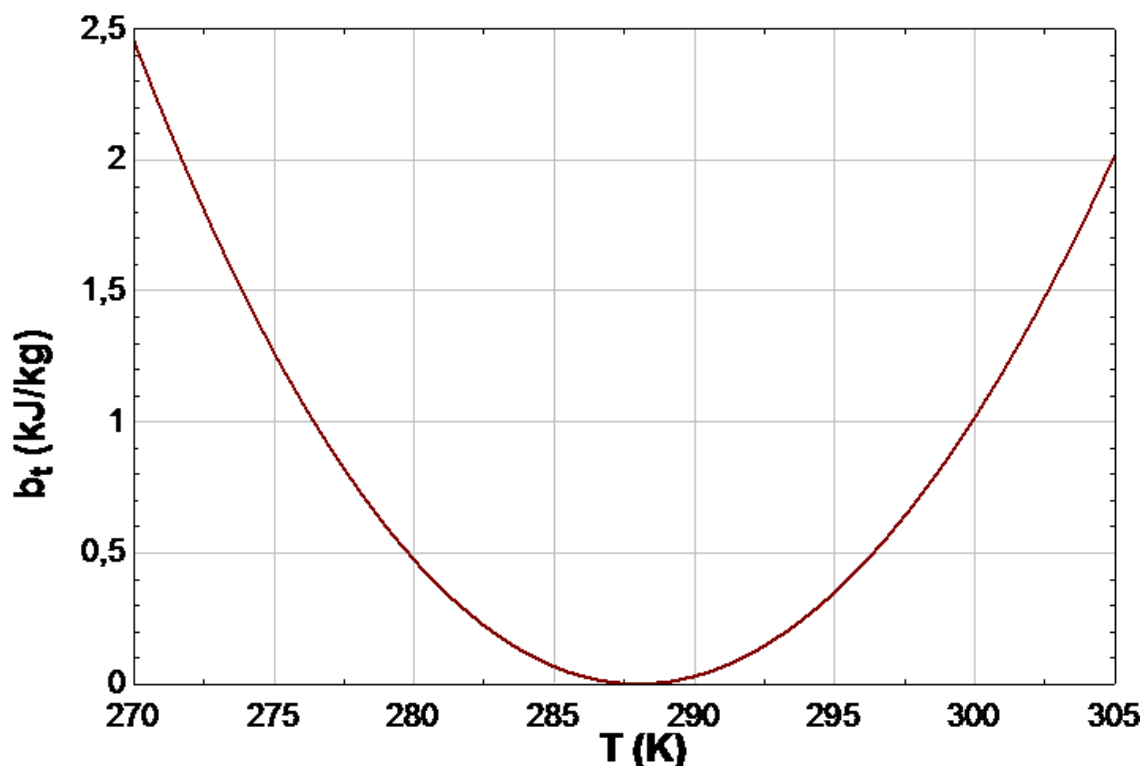


Figura 23: Variación de la exergía térmica del río en función de la temperatura.

5.2.2. Exergía mecánica.

El componente mecánico de la exergía se calcula a partir del volumen específico de la solución (agua del río) -el cual puede aproximarse sin serio error al del agua pura ($v_{H_2O} = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$) (Perry & Green, 1997) - y de la diferencia de presión (kPa) con el ambiente de referencia.

$$b_{mec} = v_{H_2O}(p - p_0)$$

Ecuación 3: Exergía mecánica del agua de un río.

Esta componente sería representativa si se analizasen en el estudio las estaciones de bombeo, los sistemas subterráneos de conducción de agua o el agua recogida en los embalses. En el estudio de un río o de otra masa de agua, se puede asignar un valor a esta componente cuando la altura del flujo se conozca en cada punto o tramo de río.

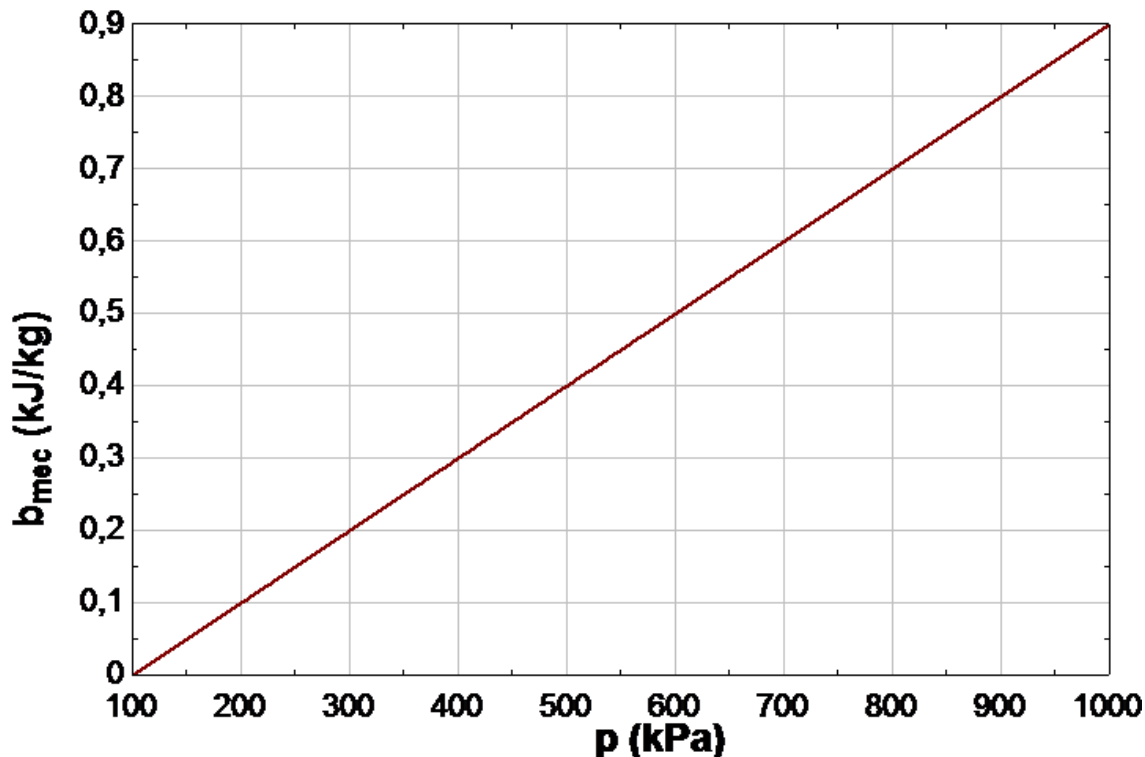


Figura 24: Variación de la exergía mecánica en función de la presión.

5.2.3. Exergía potencial.

La exergía potencial se calcula tomando en cuenta las alturas z (km) respecto del nivel del mar. El parámetro g representa la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y z_0 la altitud del entorno de referencia ($z_0 = 0$ al nivel del mar).

$$b_{pot} = g(z - z_0)$$

Ecuación 4: Exergía potencial del agua de un río.

Aunque este término tiene su mayor importancia en el nacimiento del río, se debe considerar con especial atención el caso de los embalses con instalaciones para generación de energía hidroeléctrica: esta exergía potencial se convertirá primero en energía mecánica y después en eléctrica.

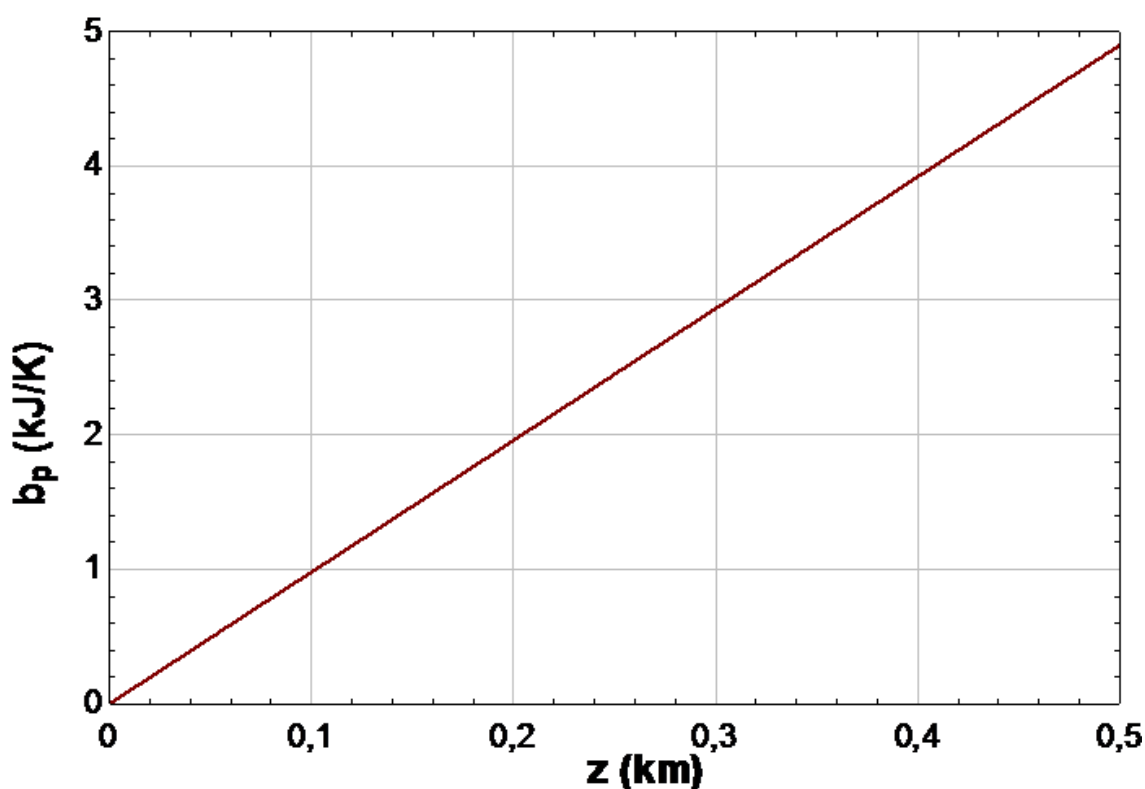


Figura 25: Variación de la exergía potencial en función de la altura.

5.2.4. Exergía cinética.

La exergía cinética se calcula a partir de la velocidad absoluta C (m/s) del agua en la estación de medida. El 1000 que figura en la fórmula corresponde a un mero factor de conversión para obtener las unidades deseadas.

$$b_{cin} = \frac{1}{2} \left(\frac{C^2 - C_0^2}{1000} \right)$$

Ecuación 5: Exergía cinética del agua de un río.

A menos que la estación de medida esté emplazada en rápidos o en el corazón de una cascada, este término no debería tener demasiada relevancia en ningún caso. El entorno de referencia se considera estático, de modo que $C_0 = 0$ por definición.

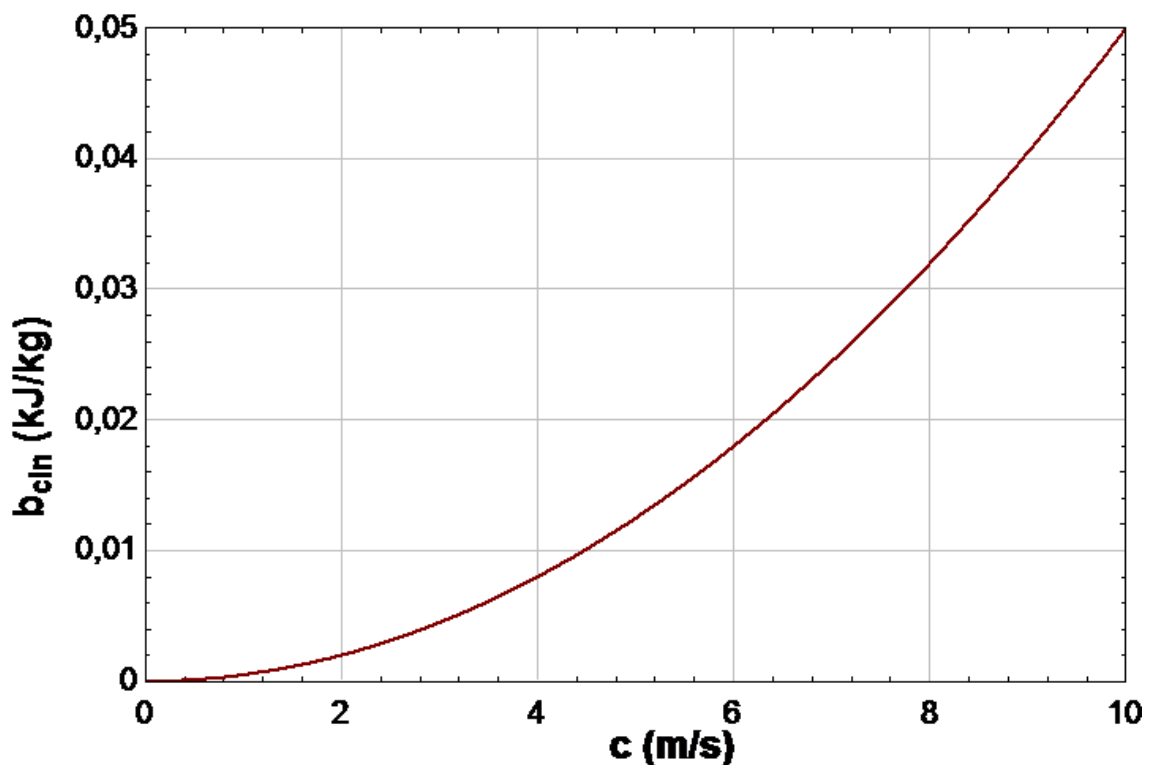


Figura 26: Variación de la exergía cinética en función de la velocidad.

5.2.5. Exergía química de formación.

La exergía química intrínseca de cualquier elemento se encuentra fácilmente en cualquier tabla de exergía química:

$$b_{quím,comp} = \Delta G_{f_i} + \sum_e n_e b_{ch,n_e}$$

Ecuación 6: Exergía química debida a la composición del agua de un río.

Donde ΔG_f es la energía libre de formación de Gibbs, n es la cantidad (kmol) del elemento e y b_{ch,n_e} es la exergía química estándar del elemento. Este componente representa la energía necesaria para formar una determinada molécula a partir de los elementos tal y como se encuentran en el ambiente de referencia. Si la molécula se encuentra exactamente igual en el ambiente, su componente de exergía de formación es nulo.

En este aspecto, existen varias técnicas para realizar la caracterización del río. Los métodos comúnmente usados hoy en día para medir la materia orgánica (MO) presente en el agua son la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT) y demanda total de oxígeno (DTO). Para este trabajo se obtuvieron las medidas de la DBO, pero se considera oportuno caracterizar la exergía química orgánica en función del COT. Para realizar esta transformación entre DBO y COT, se emplea un factor experimental de 0,5 (Metcalf & Eddy, 2003).

$$b_{quím,org}(kJ/kg) = \frac{45}{1000} * COT(mg/l)$$

Ecuación 7: Exergía química orgánica en función del Carbono Orgánico Total (COT).

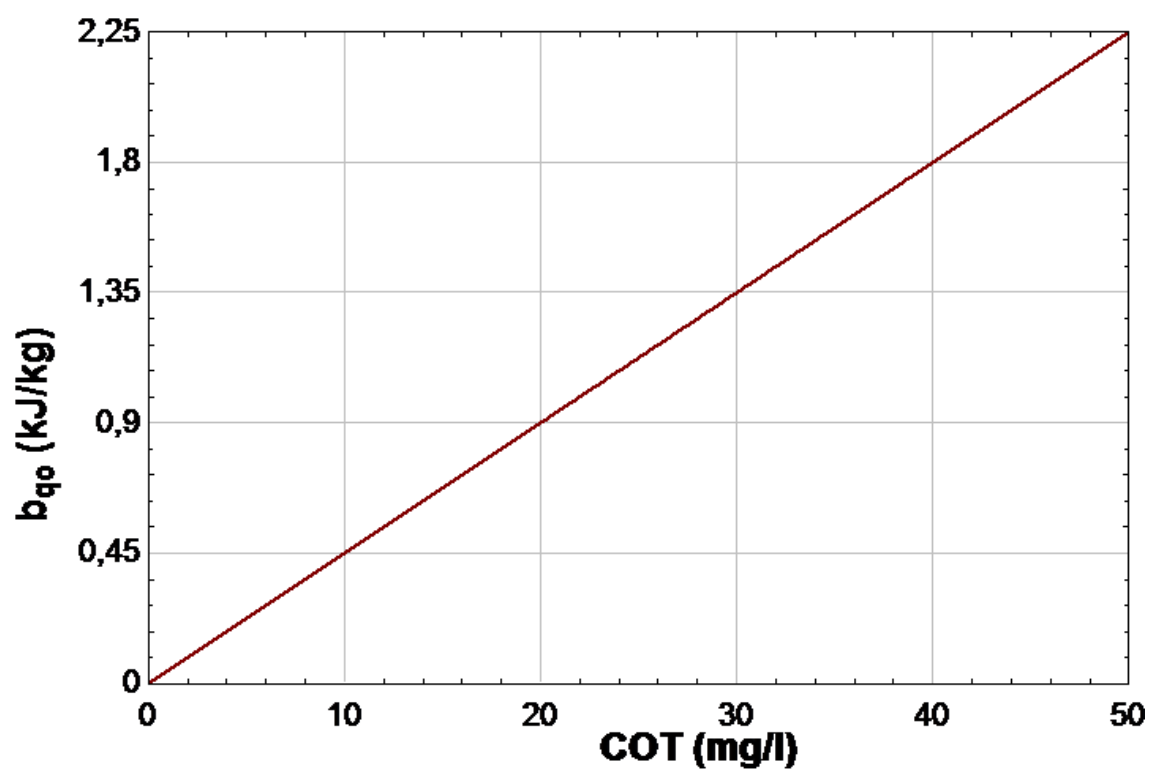


Figura 27: Variación de la exergía química orgánica en función del Carbono Orgánico Total.

5.2.6. Exergía química de concentración.

Además de la exergía química de formación, la concentración de cada sustancia en la masa de agua tiene que ser comparada con su concentración en el estado de referencia. Este término es el término más complejo de calcular porque hay tres diferentes contribuciones que han de tenerse en cuenta: la concentración de agua pura y las contribuciones correspondientes a las sustancias inorgánicas y orgánicas disueltas.

$$b_{quím,conc} = RT_0 \sum_i x_i \ln \left(\frac{a_i}{a_0} \right)$$

Ecuación 8: Exergía química debida a la concentración de iones en el agua de un río.

Donde x_i es la fracción molar y a_i es el coeficiente de actividad de la sustancia i en el agua. Las actividades se utilizan más que las concentraciones molares, ya que se trata con disoluciones.

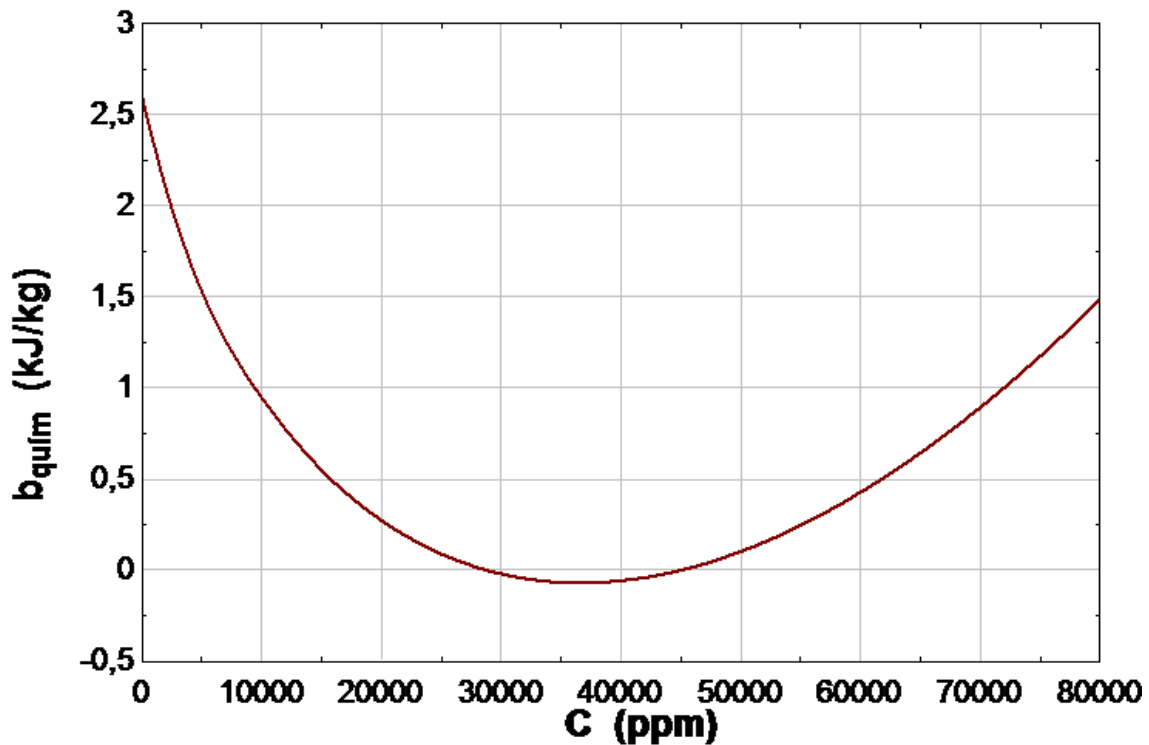


Figura 28: Variación de la exergía química en función de la concentración.

6. Procedimiento seguido.

Como ya se ha mencionado en el capítulo 5, cada uno de los componentes de la exergía se calcula a partir de uno o varios parámetros. Es necesario entonces hacer una recopilación exhaustiva de los valores de dichos parámetros.

Parámetro determinante	Componente exergética
Temperatura	Térmica
Presión	Mecánica
Altitud	Potencial
Velocidad	Cinética
DBO/COT	Química orgánica
Conductividad/Concentraciones iones	Química inorgánica

Tabla 3: Relación parámetro determinante – componente de exergía.

En este estudio, se tiene en cuenta el periodo comprendido entre octubre del 2002 y septiembre del 2006, lo que suma un total de 4 años hidrológicos divididos en los correspondientes 48 meses.

El siguiente paso es determinar cuántos puntos a lo largo del cauce principal de la cuenca serán objeto de estudio, y la localización de estos puntos. El río Ebro es dividido en un número determinado de tramos, desde el nacimiento a la desembocadura.

Para caracterizar mejor el río, se controlan medidas, además del cauce principal, de los principales afluentes. Se analizan los datos disponibles de cantidad (estaciones de aforo) y los de calidad, que son determinados a partir de las medidas tomadas por la red de estaciones CEMAS (Control del Estado de las Masas de Agua Superficiales) explicada en la sección 4.4.2.

Estos datos físico-químicos, junto con otra mucha y variada información de la hidromorfología de la zona, características del terreno, condiciones ambientales, usos del agua, se introducen en el programa Aquatool² para la realización de la simulación

² Aquatool es un programa para la edición de grafos, diseñado por la Universidad Politécnica de Valencia, empleado para la simulación de cuencas (Universidad Politécnica de Valencia).

de la cuenca, obteniendo así información detallada de cada uno de los tramos en que se ha dividido el río para su análisis.

Estos datos de salida del simulador proporcionan la base para construir el perfil exergético de cauce principal del Ebro (Ebro simplificado).

Tras la representación gráfica y análisis de las variables físicas en el río (caudal, conductividad, materia orgánica, etc.) se procede al cálculo de la exergía del río. Como ya se indicó en el capítulo 5, la distinta naturaleza y orden de magnitud de las diferentes componentes de la exergía de un río hacen recomendable mantener separados los resultados de cada una de esas componentes. Así, se obtienen varios perfiles del río, uno por cada una de las variables analizadas.

Para ello, una vez trasladados estos datos a las tablas oportunas, y ordenados convenientemente, se introducen en el programa EES³ y, tras aplicar las ecuaciones explicadas en la sección 5.2, se obtienen los resultados.

En las páginas que siguen a estas líneas se explica con más detalle cada uno de los pasos dados hasta alcanzar los resultados finales.

Finalmente, se computa la exergía de cada uno de los tramos para obtener el valor total de la exergía del río. Estos valores globales de exergía (energía disponible) en el río se comparan mediante un conjunto de indicadores con el aprovechamiento actual de la cuenca.

³ EES (Engineering Equation Solver): potente programa para la resolución de todo tipo de ecuaciones desarrollado por F-Chart Software (F-Chart Software).

6.1. División en tramos de la cuenca.

La división en tramos de todos los ríos de la cuenca fue realizada por la Confederación en un trabajo interno mediante el empleo del software Aquatool. A continuación se puede observar la magnitud del esquema del Ebro, y un ejemplo del Noguera Pallaresa en el que se pueden apreciar los nudos y los tramos con claridad (afluente del Segre, a su vez afluente del Ebro):

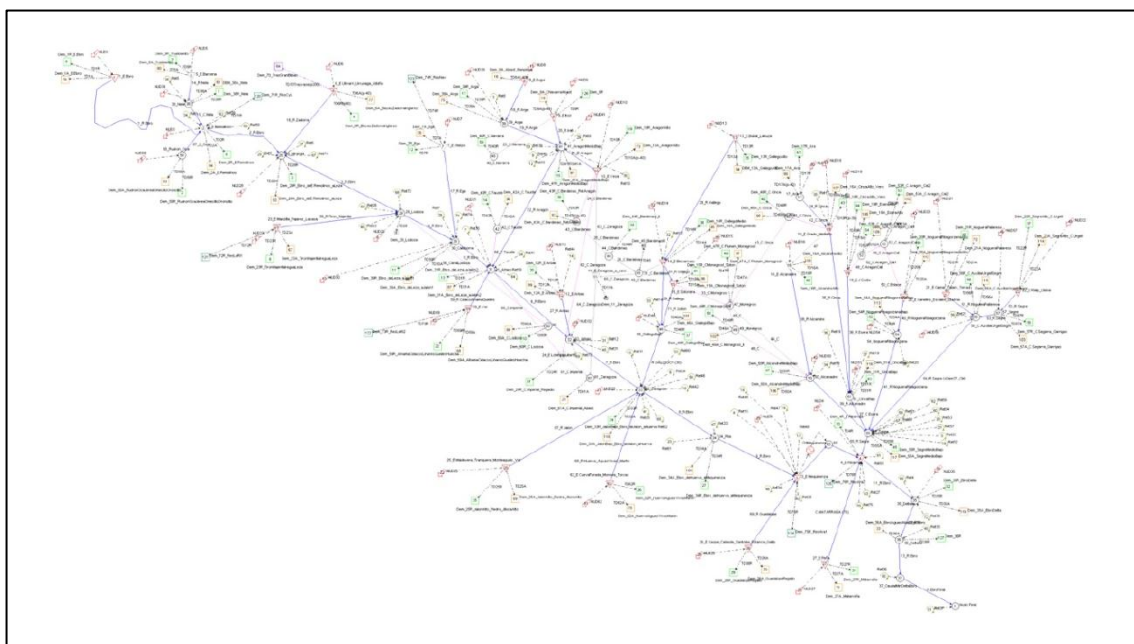


Figura 29: Esquema del Ebro dividido en tramos. Aquatool (Carrasquer, 2011).

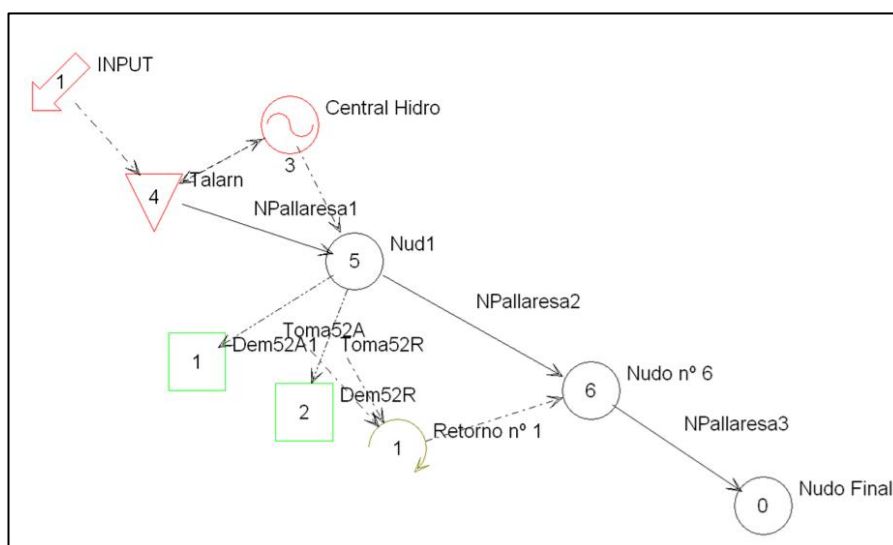


Figura 30: Ejemplo: esquema del Noguera-Pallaresa dividido en tramos. Aquatool (Carrasquer, 2011).

Para la división en tramos se tiene en cuenta todo -aportaciones, captaciones, cambio de tipo de terreno, vertidos- lo que pueda dar lugar a un cambio significativo de los parámetros del río. La DMA divide el río Ebro en 700 masas de agua tipo río, y cada uno de los tramos abarca un número determinado de estas masas. La división en tramos del río Ebro proviene de un trabajo interno de la Confederación. En su origen, el cauce principal fue dividido en 15 tramos pero para este estudio resultó conveniente unir dos de ellos en uno solo⁴. Para la división en tramos se tienen en cuenta fenómenos más o menos representativos como pueden ser: aportaciones, cambio de tipo de terreno, vertidos, captaciones, etc. Puede observarse el listado de tramos en la siguiente tabla:

Nombre Tramo	01_Ebro	02_Ebro	03_Ebro	04_Ebro	05_Ebro	06_Ebro	07_Ebro
	08_Ebro	09_Ebro	10_Ebro	11_Ebro	12_Ebro	13_Ebro	14_Ebro_(final)

Tabla 4: Listado de tramos en que es dividido el río Ebro.

6.2. Recogida de datos.

Tras la división del río Ebro, el siguiente paso es determinar valores de diversos parámetros para cada uno de los tramos. Para cada tramo, se obtienen, desde octubre de 2002 hasta septiembre de 2006, las mediciones realizadas de los siguientes parámetros: altura y longitud del tramo, caudal y velocidad del agua, temperatura, conductividad, cloruro, sulfato, nitrato, nitrito, amonio, fosfato, calcio, alcalinidad, potasio, magnesio, sodio, materia en suspensión y DBO5. Además, también se obtienen las medidas de estos parámetros para algunos tramos de algunos afluentes, que se consideran determinantes para realizar la simulación de la cuenca en Aquatool.

Todos los parámetros mencionados son obtenidos mediante tres sistemas diferentes. Los datos de longitud y altura de los tramos son obtenidos mediante un visor cartográfico, la medida de caudal (la velocidad se calcula a partir del caudal y la superficie mojada) la proporciona la Confederación Hidrográfica del Ebro mediante solicitud a través de su página web y el resto de parámetros se obtienen de las estaciones CEMAS, explicadas en 4.4.2.

⁴ En el trabajo original, entre el tramo 9 y el tramo 11 se localizan dos tramos denominados conducción 79 y conducción 80 respectivamente. Éstas tienen todos los parámetros iguales así que fueron unificadas en un solo tramo denominado tramo 10, y cuya longitud es la suma de los dos mencionados.

6.2.1. El visor cartográfico de la Confederación: SITEbro (Sistema de Información Territorial del Ebro).

El Sistema de Información Territorial del Ebro, SITEbro (C. H. del Ebro), es una herramienta de visualización cartográfica, creada en el contexto de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Está disponible, para uso público, en el portal:

<http://iber.chebro.es/sitebro/sitebro.aspx>

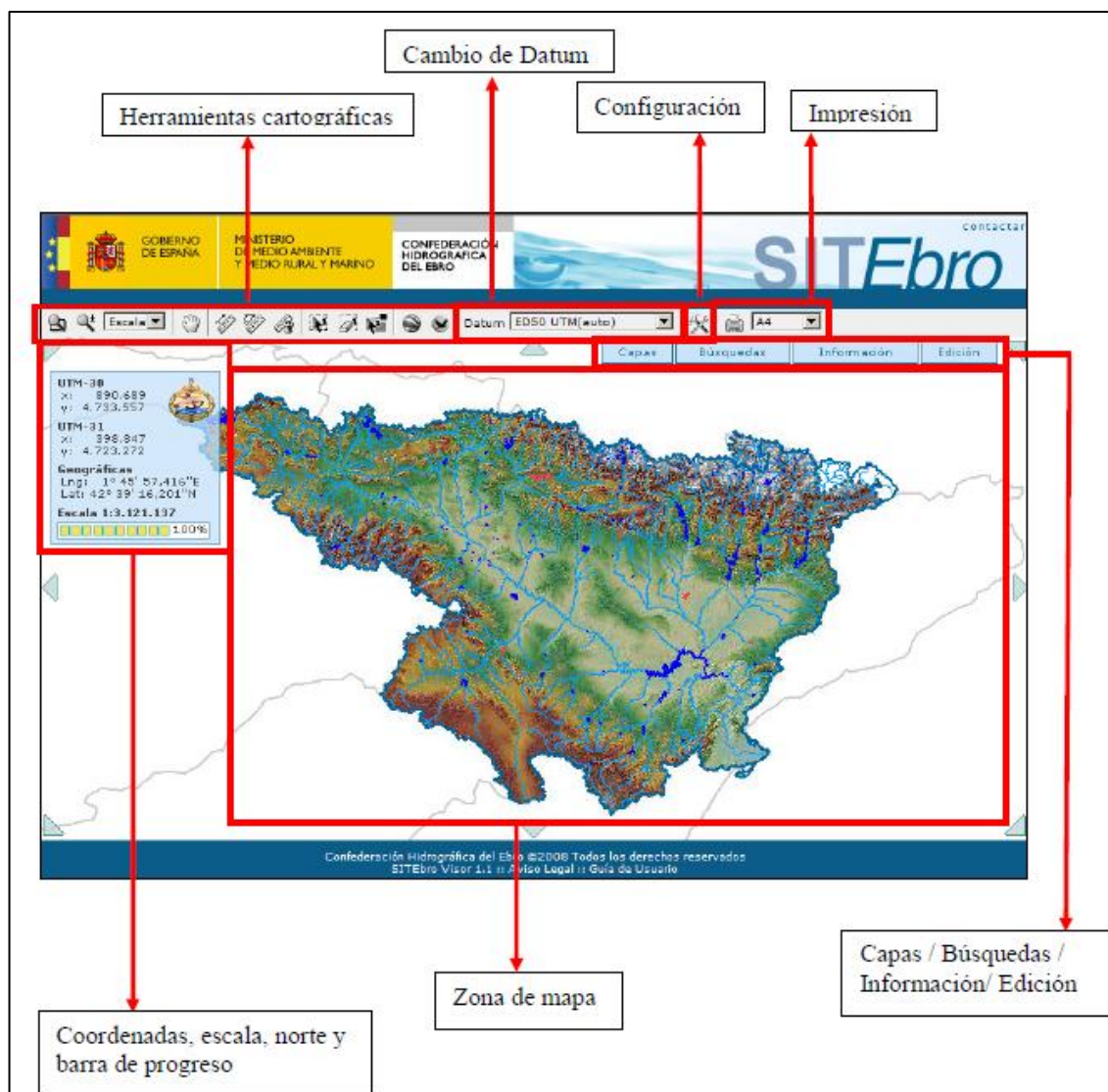


Figura 31: Herramienta de visualización cartográfica SITEbro.



Medir distancias: esta herramienta va a ir sumando la distancia, en metros, de los diferentes tramos que el usuario vaya determinando a lo largo de un trazado, y lo irá mostrando en una etiqueta sobre el mapa. El procedimiento es pinchar el primer punto de origen del trazado, e ir pinchando los puntos sucesivos, el trazado sobre el que se está calculando la distancia aparecerá en rojo. Cada vez que se pincha con el cursor en una zona se calcula la distancia total.



Ver información: empleando esta herramienta se obtiene información de los núcleos urbanos de la cuenca. Realizando un promedio de las alturas de cada núcleo urbano a lo largo de cada tramo, se obtienen las altitudes reflejadas en Tabla 5.

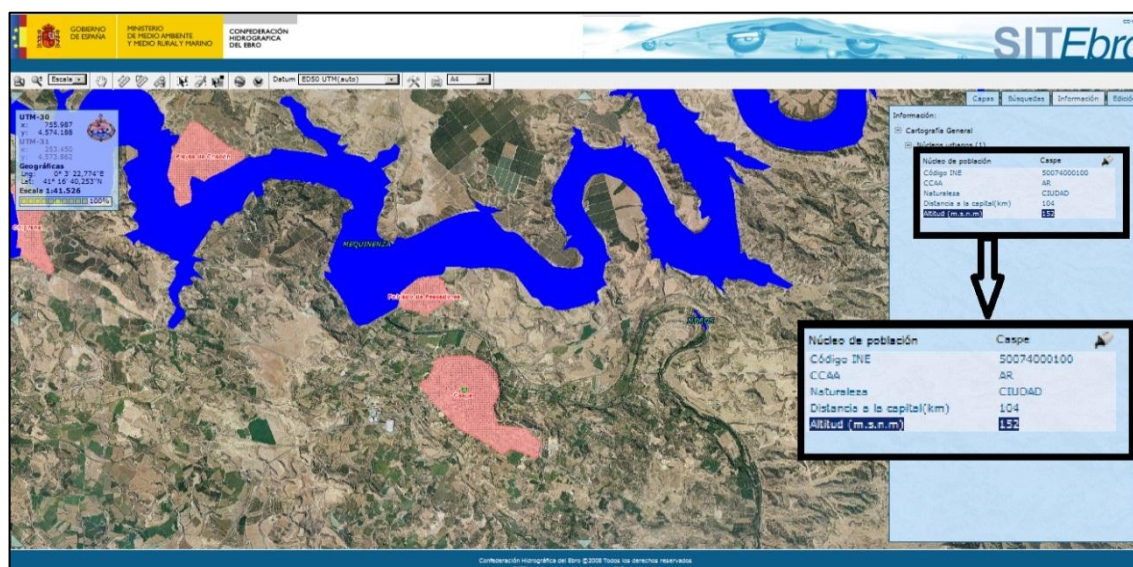


Figura 32: Midiendo altitudes mediante la herramienta SITEbro.

Nombre Tramo	L (km)	h (m)
01_Ebro	145,3	820
02_Ebro	75,4	650
03_Ebro	59,2	500
04_Ebro	108,7	380
05_Ebro	63,5	300
06_Ebro	40,2	250
07_Ebro	72,1	200
08_Ebro	96,9	190
09_Ebro	96,9	190
10_Ebro	3,2	150
11_Ebro	48,4	75
12_Ebro	26,9	50
13_Ebro	28,0	20
14_Ebro_(final)	45,2	5

Tabla 5: Longitudes y altitudes de los tramos del Ebro.

6.2.2. SAIH. Petición de datos históricos.

Ya se ha mencionado anteriormente el sistema SAIH (ver sección 4.4.1). Para la obtención de los datos cuantitativos, basta con realizar una petición a la Confederación Hidrográfica del Ebro (C. H. del Ebro) manifestando el deseo de obtener los datos de caudal medio mensual en cada uno de los 14 tramos para cada uno de los 48 meses objeto de estudio.

<http://195.55.247.237/saihebro/index.php?url=/historicos/peticion>

SAIH Ebro Confederación Hidrográfica del Ebro El SAIH Ebro Tiempo real Previsiones Informes Noticias **Datos históricos** Contacto Usuarios

Solicitud de datos históricos

Si Ud. lo desea puede suscribirse a este servicio privado para seleccionar y recoger los datos históricos on-line. Para realizar la suscripción a este servicio hay que:

- Si todavía no es usuario privado, hacer click en **Registro Usuarios** y registrarse con la casilla de acceso a datos históricos activada.
- Si ya es usuario privado, comprobar que tiene acceso a datos históricos haciendo click en **Login** y introduciendo su usuario y contraseña.

Si Ud. es un usuario esporádico de datos históricos y no desea suscribirse como usuario privado, le rogamos nos envíe un correo electrónico haciendo click en **enviar correo** con los siguientes datos:

- Código de las estaciones: ej. A001, E001.
- Tipos de señales: ej. nivel, caudal, pluviometría.
- Intervalo de fechas: ej. fecha inicio y fecha final.
- Tipo de dato: valores cada 15 minutos o valores consolidados (medias, máximos y mínimos) de un día, mes o año.
- Formato de envío: Texto delimitado (CSV) ó Microsoft Excel (XLS).

También puede consultar y descargar Datos Históricos de caudal en estaciones de aforo en río y datos de embalses de toda la red foronómica de la Confederación Hidrográfica del Ebro en <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/>

Para consultar información relativa al Área de calidad de aguas puede consultar la siguiente página: <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/CalidadDeAguas.html>

Figura 33: Solicitud de datos históricos. SAIH.

Los datos de caudal son simulados (como se explica en el apartado siguiente) y el resultado es una tabla como la Tabla 6 para cada uno de los 48 meses.

Fecha	Nombre Tramo	Q (m3/s)
oct-02	01_Ebro	0,00
oct-02	02_Ebro	11,95
oct-02	03_Ebro	30,27
oct-02	04_Ebro	49,22
oct-02	05_Ebro	50,94
oct-02	06_Ebro	84,39
oct-02	07_Ebro	85,32
oct-02	08_Ebro	91,71
oct-02	09_Ebro	93,65
oct-02	10_Ebro	13,97
oct-02	11_Ebro	0,00
oct-02	12_Ebro	0,64
oct-02	13_Ebro	2,47
oct-02	14_Ebro_(final)	2,71

Tabla 6: Ejemplo de caudales en cada tramo para el mes de octubre del 2002.

En la realidad, el caudal nunca es cero, pero el simulador da estos valores debido a la existencia de embalses en esos puntos. Estos ceros hacen que fallen algunos valores en la simulación de calidad, como se verá más adelante.

6.2.3. CEMAS. Composición del agua.



Figura 34: Red CEMAS. Control de Estado de las Masas de Agua Superficiales.

Para cada tramo del río, existe una estación en la que se mide la composición del agua cada determinado tiempo:

Nombre tramo	Estación CEMAS
01_Ebro	599.- Ebro en Reinosa
02_Ebro	165.- Bayas en Miranda
03_Ebro	208.- Ebro en Conchas de Haro
04_Ebro	502.- Ebro en Sartaguda
05_Ebro	504.- Ebro en Rincón del Soto
06_Ebro	506.- Ebro en Tudela
07_Ebro	580.- Ebro en Cabañas de Ebro
08_Ebro	112.- Ebro en Sástago
09_Ebro	112.- Ebro en Sástago
10_Ebro	112.- Ebro en Sástago
11_Ebro	121.- Ebro en Flix
12_Ebro	511.- Ebro en Benifallet
13_Ebro	511.- Ebro en Benifallet
14_Ebro_(final)	027.- Ebro en Tortosa

Tabla 7: Ejemplo de estaciones CEMAS correspondientes a cada tramo del Ebro.

El siguiente paso es acceder a los datos tomados en cada estación. Desde esta página (C. H. del Ebro), en la sección de resultados analíticos, se accede a las fichas elaboradas con los datos medidos:

<http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/cemas/inicio.htm>

C.E.M.A.S. Control del Estado de las Masas de Agua Superficiales

Resultados analíticos

Desde esta página se accede a los resultados de los análisis físico-químicos realizados en las redes de control de calidad de aguas superficiales. Para facilitar el acceso a los últimos resultados, se han separado por distintos intervalos de fechas.

Aguas superficiales 1980 - 2001	Aguas superficiales 2002 - 2007	Aguas superficiales 2008 -
<p>Selección el punto</p> <ul style="list-style-type: none"> 0001 - Ebro en Miranda 0002 - Ebro en Castejón 0003 - Ega en Andosilla 0004 - Arga en Funes 0005 - Aragón en Caparroso 0009 - Jalón en Huérmeda 0010 - Jiloca en Daroca 0011 - Ebro en Zaragoza 0013 - Esera en Graus 0014 - Martín en Híjar 0015 - Guadalupe - Deriv. Ac. Vieja de 0017 - Cinca en Fraga 0018 - Aragón en Jaca 0020 - Carol en Puigcerdà 	<ul style="list-style-type: none"> 0591 - C. Seros / Embalse de Utxesa 0592 - Ebro / Pina de Ebro 0593 - Jalón / Terret 0594 - Najerilla / Baños de Río Tobia 0595 - Ebro / San Vicente de la Sonsier 0596 - Huerva / María de Huerva 0597 - Villacorta / Villaller 0598 - Guadalupe / Santolea, derivación 0599 - Ebro / Reinsay, embalse del Ebr 0600 - Bergantes / Forcall 0605 - Ebro / Amposta 0606 - Noguera Pallaresa / Sort 0607 - Flamisell / Pobla de Segur 0608 - Noguera Pallaresa / Tremp 0609 - Salón / Vilatorrada (TCA) - Aguas 	<p>Selección el punto</p> <ul style="list-style-type: none"> 0001 - Ebro / Miranda de Ebro 0002 - Ebro / Castejón 0003 - Ega / Andosilla 0004 - Arga / Funes 0005 - Aragón / Caparroso 0009 - Jalón / Huérmeda 0010 - Jiloca / Daroca 0011 - Ebro / Zaragoza - Monzalbarba 0013 - Esera / Graus 0014 - Martín / Híjar 0015 - Guadalupe / der. Acequia vieja c 0017 - Cinca / Fraga 0018 - Aragón / Jaca 0022 - Valira / Anserall

Ver fichero

Fecha de última actualización: 8 de marzo de 2011 (Resultados del 4º trimestre de 2010)


Cada página de información agrupa hasta 8 muestras. En el encabezado de cada una de ellas figuran la fecha y hora de los muestreos. No se incluyen las observaciones adjuntas al análisis, que en algunas ocasiones pueden ser determinantes para la interpretación de los resultados. A esta información se puede acceder a través de los informes de seguimiento o realizando la consulta al [Área de Calidad de Aguas](#).

Entre los valores medidos de los distintos parámetros aparecen una serie de símbolos. Los principales son:

ND	Valor medido inferior al límite de detección del método de determinación.
NR	Determinación no realizada.

Figura 35: CEMAS. Resultados analíticos.

Y haciendo clic en “Ver fichero” accedemos a la información:



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL EBRO

Contrata de Aguas

REDES DE CONTROL DE CALIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES

RESULTADOS ANALÍTICOS

Punto Nº 0599 - Ebro / Reinos, embalse del Ebro

Parámetro	Unidad	02/12/02 13:46	03/04/03 13:30	08/08/03 14:00	02/12/03 13:30	01/06/04 14:00	01/12/04 13:16	22/08/06 12:10	30/08/06 10:30
pH		8.0	8.1	8.0	7.9	8.4	7.8	8.00	8.40
Temperatura del aire	°C	9.2	5.7	23.5	8.5	20.3	7.5	27.9	22.8
Temperatura del agua	°C	7.4	9.7	20.0	7.5	20.0	5.8	13.7	21.7
Conductividad a 20 °C	µS/cm	230	200	200	220	210	190	190	198
Aspecto		1	1	1	1	1	1	SIN CAMBIOS	NORMAL
Oxígeno disuelto	mg/L O2	10.3	9.7	9.2	9.7	10.2	10.8	9.0	12.9
Oxígeno disuelto (% sat.)	% sat.	86.0	85.5	102	81.0	113	89.3	107.2	149.6
Fenoles examen gustativo	mg/L C6H5OH							Ausencia	Ausencia
Sólidos en suspensión	mg/L	18	5	<3	3	4	<5	2	3
DQO al permanganato	mg/L O2							2.8	2.7
Demanda química de oxígeno	mg/L O2						10.2		
Materia orgánica U.V.	mg/L O2	16.0	16.0	14.9	15.9	13.2	15.9		
DBO5	mg/L O2	2.2	4.2	<2		3.6	<2.0	<5	<5
Amonio total	mg/L NH4	0.40	<0.13	<0.13	0.19	<0.13	<0.13	<0.10	<0.10
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L N	<1.0		<1.0		<1.0		<1.0	<1.0
Cloruros	mg/L Cl	9.8	7.3	7.4	<10	10.4	10.0	7.9	9.0
Sulfatos	mg/L SO4	42.5		27.3		31.3		26.6	29.7
Nitratos	mg/L NO3	1.5	2.0	3.9	2.4	<2.0	1.6	1.7	1.1
Fosfatos	mg/L PO4	0.19	<0.05	0.05	0.09	0.07	0.35	<0.10	<0.10
Fósforo Total	mg/L P						<0.09		
Tensoactivos aniónicos	mg/L L.A.B.	<0.08		<0.08		<0.08		<0.05	<0.05
Fenoles	mg/L C6H5OH							<0.005	<0.010
Cianuros	mg/L CN	<0.010		<0.010		<0.010		<0.005	
Fluoruros	mg/L F	0.11		<0.10		<0.10		<0.100	
Hidrocarburos Método IR	mg/L							<0.01	
Coliformes totales a 37°	UFC/100 mL	56		74		37		5	30
Coliformes fecales	UFC/100 MI	11		3		0		2	3
Estreptococos fecales	UFC/100 mL	8		18		4		0	
Salmonelas SL	/1000 mL	Ausencia		Ausencia		No detectado		Ausencia	
Arsénico	mg/L	0.00041		0.00030		0.00039		<0.002	
Bario	mg/L							0.017	
Boro	mg/L							<0.010	
Cadmio	mg/L	<0.0005		<0.00050		<0.00050		<0.001	
Cromo	mg/L	<0.002		<0.0020		<0.0020		<0.002	
Cobre	mg/L	<0.002		<0.0020		0.0035		<0.002	<0.002
Hierro	mg/L	0.11		0.05		0.05		0.099	0.046
Mercurio	mg/L	<0.00007		<0.00007		<0.00007		<0.00010	
Manganeso	mg/L							0.006	0.006
Plomo	mg/L	<0.010		<0.0050		<0.0050		<0.002	
Selenio	mg/L	<0.00015		<0.00020		<0.00020		<0.002	
Zinc	mg/L	0.019		0.024		0.066		0.006	0.002
a-HCH	µg/L	ND		ND		ND		<0.02	
b-HCH	µg/L	ND		ND		ND		<0.05	
γ-HCH	µg/L	ND		ND		ND		<0.02	
d-HCH	µg/L	ND		ND		ND		<0.05	
Suma Hexaclorociclohexano	µg/L	ND		ND		ND			

ND: Valor medido inferior al límite de detección / *: Determinación considerada como no representativa

Figura 36: Ejemplo de hoja de resultados analíticos.

Los datos de los parámetros oportunos son trasladados a una tabla Excel, para facilitar su almacenamiento y el posterior manejo de los mismos. Siguiendo el mismo procedimiento para cada una de las distintas estaciones, 51 en total, entre cauce principal y afluentes, se obtiene una tabla de datos para cada parámetro. Ejemplo (amonio):

NH4 (mg/L)					
Estación referencia		003.- Ega en Andosilla	004.- Arga en Funes	015.- Guadalope, Der. Acequia	...
AÑO	MES				
2002	oct	0,13	0,18	0,13	...
2002	nov	0,13	0,18	0,13	...
2002	dic	0,13	0,18	0,13	...
2003	ene	0,13	0,18	0,13	...
2003	feb	0,13	0,18	0,13	...
2003	mar	0,13	0,13	0,13	...
2003	abr	0,13	0,13	0,13	...
2003	may	0,13	0,13	0,13	...
2003	jun	0,13	0,13	0,13	...
2003	jul	0,13	0,13	0,13	...
2003	ago	0,13	0,13	0,13	...
2003	sep	0,13	0,13	0,13	...
2003	oct	0,13	0,13	0,13	...
2003	nov	0,13	0,13	0,13	...
2003	dic	0,13	0,13	0,13	...
2004	ene	0,13	0,13	0,13	...
2004	feb	0,13	0,13	0,13	...
...

Tabla 8: Ejemplo de tabla de datos para el amonio.

Los parámetros obtenidos a través de las fichas CEMAS y luego utilizados para la simulación en la cuenca y el cálculo de las componentes exergéticas son: pH, temperatura del agua, conductividad, oxígeno disuelto, DBO5, amonio total, cloruros, sulfatos, nitratos, nitritos, fosfatos, carbonatos, calcio, magnesio, sodio, potasio, alcalinidad y materia en suspensión.

6.3. Simulación en Aquatool: SIMGES & GESCAL.⁵

El modelo SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas perteneciente al Sistema Soporte de Decisión (SSD) Aquatool. Aquatool ha sido desarrollado durante más de una década por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos de la Universidad Politécnica de Valencia. Este SSD está compuesto por una serie de herramientas que permiten la modelación de sistemas de recursos hídricos a todos los niveles como son optimización, simulación, modelación de la calidad del agua, aspectos económicos, aguas subterráneas, hidrología, etc. El modelo SIMGES permite la modelación de sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial.

La herramienta GESCAL permite el desarrollo de modelos de calidad del agua sobre modelos de simulación de sistemas de recursos hídricos previamente desarrollados con el módulo SIMGES. La calidad en un tramo de río o en un embalse no sólo depende de los procesos que se producen sino también de la gestión del sistema y de la calidad de los diferentes elementos que tengan relación con el elemento en cuestión. Los constituyentes que se pueden modelar son los siguientes:

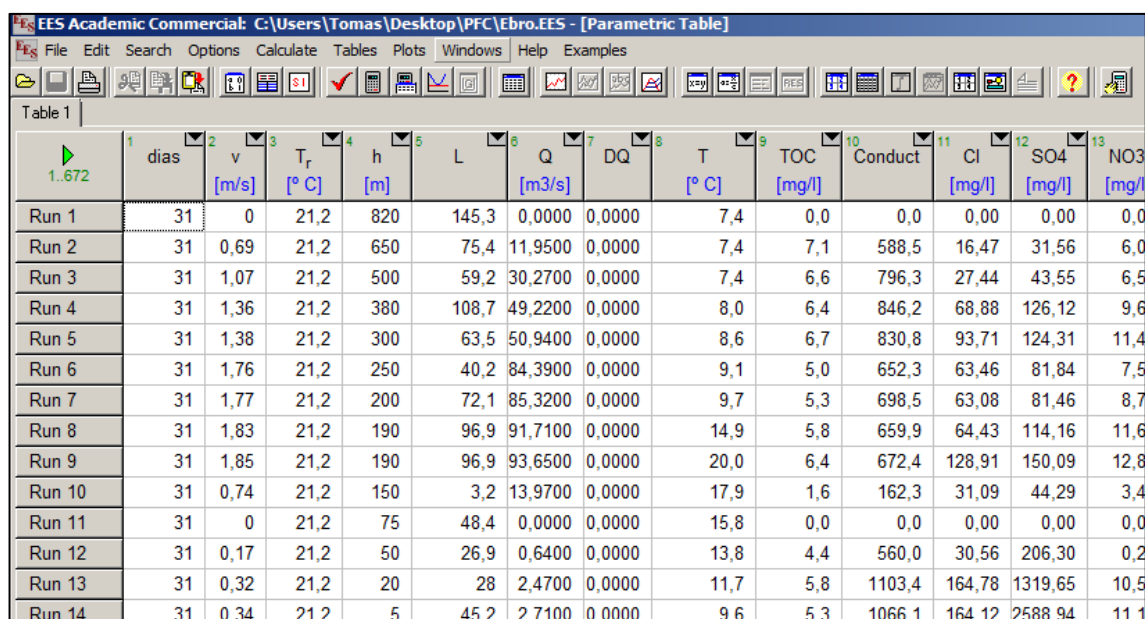
- Temperatura.
- Contaminantes arbitrarios.
- Oxígeno disuelto y Materia Orgánica Carbonosa (MOC).
- Ciclo del nitrógeno: nitrógeno orgánico, amonio y nitratos. Y su afección sobre el oxígeno disuelto.
- Eutrofización: ciclo del nitrógeno, fitoplancton (como clorofila-a, fósforo orgánico e inorgánico; y su afección sobre el oxígeno disuelto).

Fuente: Portal de desarrollo de Aquatool (Universidad Politécnica de Valencia).

⁵ Esta parte se realizó dentro del mismo trabajo de investigación en el que está enmarcado el PFC, sin embargo, no es competencia de éste.

6.4. Cálculos en EES.

El siguiente paso es introducir los datos obtenidos tras la simulación en Aquatool en el EES (Engineering Equation Solver) para el cálculo de los resultados finales. El EES es un programa para la resolución de ecuaciones desarrollado por F-Chart Software.



The screenshot shows the EES Academic Commercial software interface. The title bar indicates the file path: C:\Users\Tomas\Desktop\PFC\Ebro.EES - [Parametric Table]. The menu bar includes File, Edit, Search, Options, Calculate, Tables, Plots, Windows, Help, and Examples. The toolbar contains various icons for file operations, calculations, and plotting. The main window displays 'Table 1' with 14 runs of data. The columns represent different parameters, and the rows represent individual simulation runs.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	días	v [m/s]	T _r [° C]	h [m]	L	Q [m ³ /s]	DQ	T [° C]	TOC [mg/l]	Conduct	Cl [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	NO ₃ [mg/l]
Run 1	31	0	21,2	820	145,3	0,0000	0,0000	7,4	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0
Run 2	31	0,69	21,2	650	75,4	11,9500	0,0000	7,4	7,1	588,5	16,47	31,56	6,0
Run 3	31	1,07	21,2	500	59,2	30,2700	0,0000	7,4	6,6	796,3	27,44	43,55	6,5
Run 4	31	1,36	21,2	380	108,7	49,2200	0,0000	8,0	6,4	846,2	68,88	126,12	9,6
Run 5	31	1,38	21,2	300	63,5	50,9400	0,0000	8,6	6,7	830,8	93,71	124,31	11,4
Run 6	31	1,76	21,2	250	40,2	84,3900	0,0000	9,1	5,0	652,3	63,46	81,84	7,5
Run 7	31	1,77	21,2	200	72,1	85,3200	0,0000	9,7	5,3	698,5	63,08	81,46	8,7
Run 8	31	1,83	21,2	190	96,9	91,7100	0,0000	14,9	5,8	659,9	64,43	114,16	11,6
Run 9	31	1,85	21,2	190	96,9	93,6500	0,0000	20,0	6,4	672,4	128,91	150,09	12,8
Run 10	31	0,74	21,2	150	3,2	13,9700	0,0000	17,9	1,6	162,3	31,09	44,29	3,4
Run 11	31	0	21,2	75	48,4	0,0000	0,0000	15,8	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0
Run 12	31	0,17	21,2	50	26,9	0,6400	0,0000	13,8	4,4	560,0	30,56	206,30	0,2
Run 13	31	0,32	21,2	20	28	2,4700	0,0000	11,7	5,8	1103,4	164,78	1319,65	10,5
Run 14	31	0,34	21,2	5	45,2	2,7100	0,0000	9,6	5,3	1066,1	164,12	2588,94	11,1

Figura 37: Muestra de la tabla de datos introducida en el EES y lista para comenzar el cálculo.

En el EES se programan las funciones oportunas para el cálculo de las diferentes componentes de exergía explicadas en el capítulo 5, y se obtienen los resultados buscados, que son exportados de nuevo a Excel para facilitar el manejo de los mismos y la elaboración de gráficas.

7. Resumen de resultados.

A continuación se presentan los resultados que se han obtenido en los diferentes apartados.

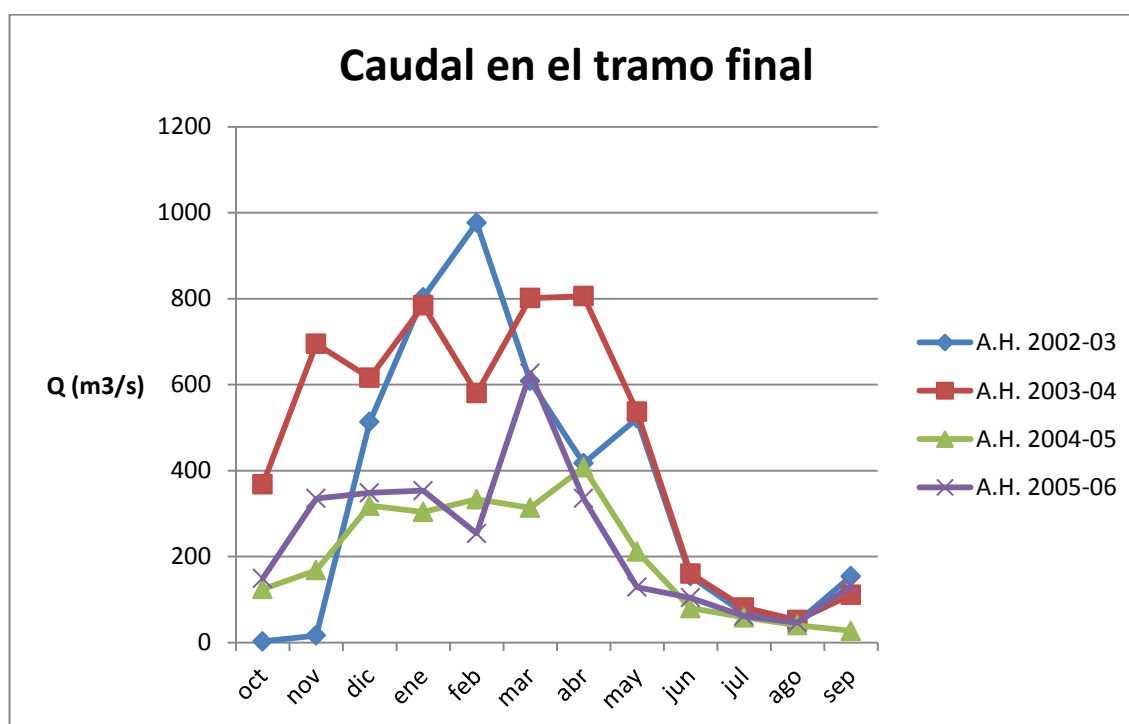
En primer lugar, se estudian las evoluciones del caudal en el río Ebro, tanto a lo largo del tiempo como a lo largo del cauce. Posteriormente se explican las variaciones de los diferentes parámetros a lo largo del cauce y las correspondientes variaciones de las distintas componentes específicas de la exergía. Después de observar la evolución de las componentes específicas, se realiza lo mismo para las componentes absolutas. Y por último, se explica un método para la integración a lo largo de todo el cauce de cada una de las diferentes componentes exergéticas.

7.1. Variación del caudal.

En esta sección se observa la variación del caudal a lo largo del tiempo y a lo largo del cauce. Las variaciones de caudal son sencillas de comprender y dan una imagen intuitiva de la cantidad de agua disponible en cualquier momento o en cualquier lugar.

7.1.1. Variación del caudal a lo largo del tiempo.

A continuación se muestra cómo varía el caudal con el paso de los meses a lo largo del año. Sólo se muestra el caso del tramo final, por considerarse el más representativo y en el que más evidentes son los cambios estacionales. Más adelante se hará referencia a esta gráfica para realizar comparaciones con los diversos tipos de exergía, justificando qué tipo de relación tiene cada uno de ellos con el caudal, en caso de tenerla.

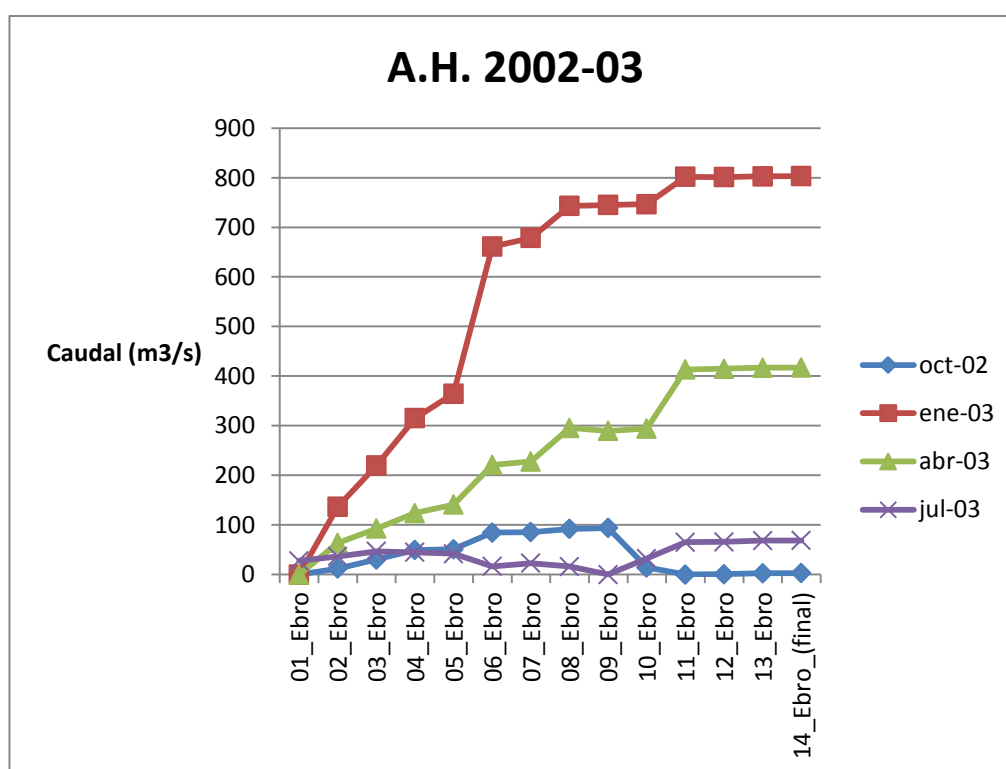


G. 1: Variación del caudal en la desembocadura a lo largo del año.

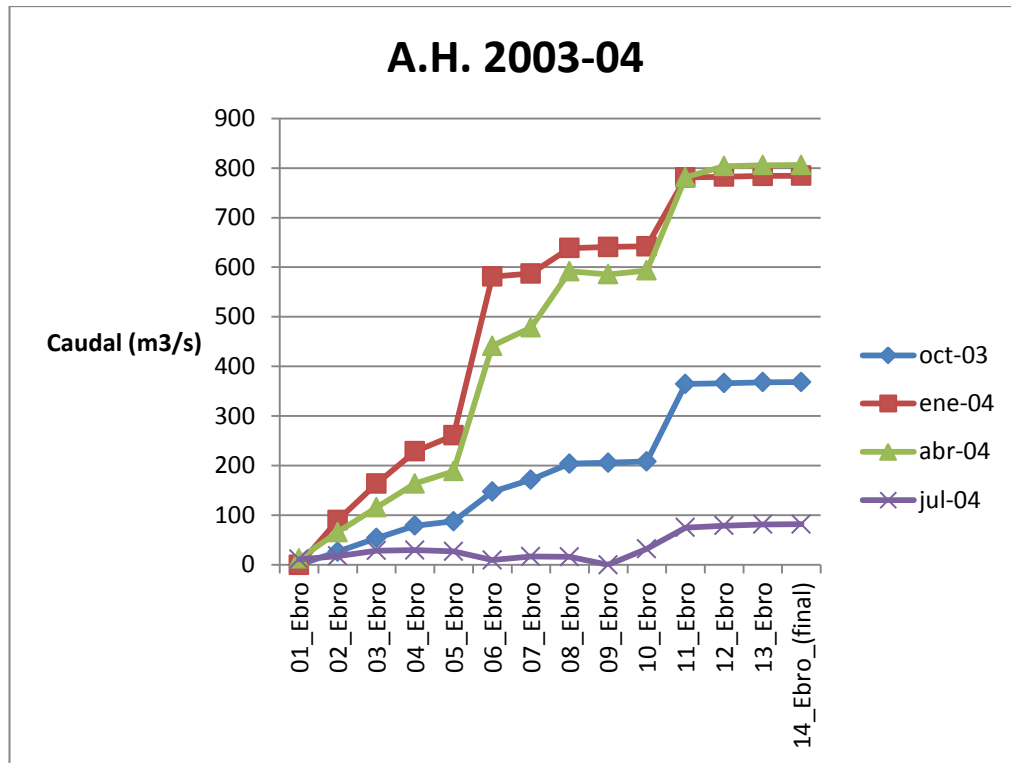
Como puede observarse en la gráfica G.1, el caudal es notablemente alto en los meses húmedos, entre enero y abril, variando entre $500 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ dependiendo de si el año es seco o húmedo. Por el contrario, en los meses secos, entre junio y septiembre, apenas se alcanzan los $100 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que da una idea del régimen irregular del río. Nótese, asimismo, que las riadas se notan poco en la gráfica, porque son amortiguadas al ser los datos medias mensuales.

7.1.1. Variación del caudal a lo largo del cauce.

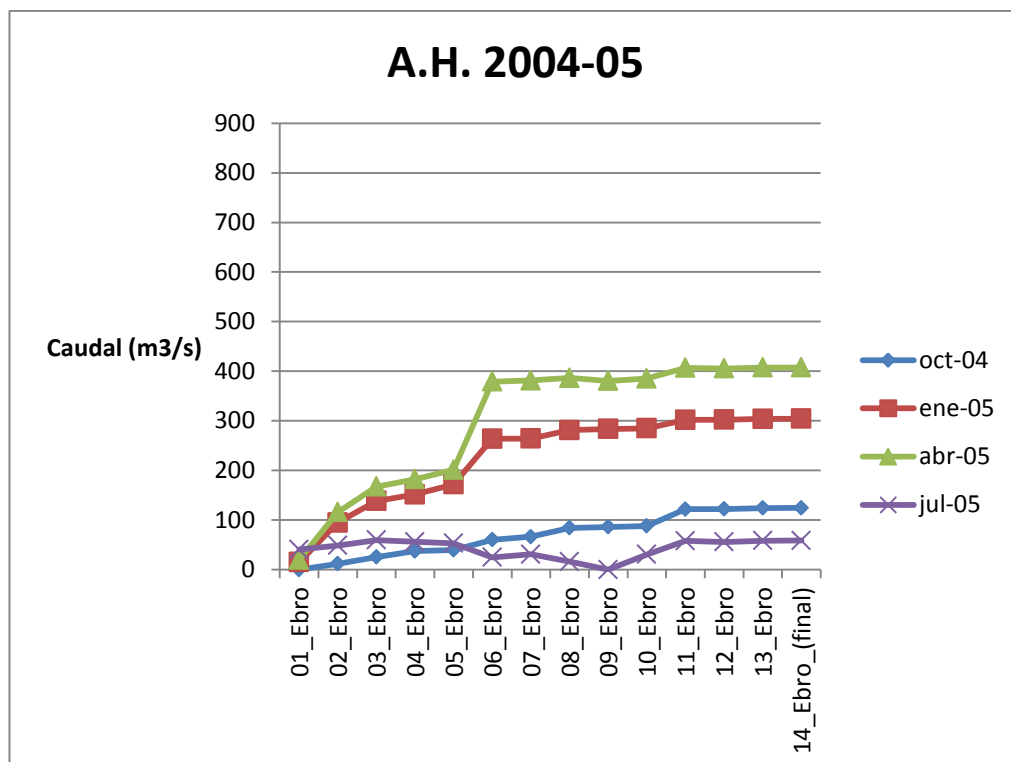
En este apartado va a estudiarse la evolución de los valores de caudal a lo largo del cauce del río Ebro para los diferentes años hidrológicos comprendidos entre octubre de 2002 y septiembre de 2006. Para la realización de las gráficas se han escogido los meses de octubre, enero, abril y julio; que son considerados representativos y dan una idea general de lo que ocurre durante el año hidrológico.



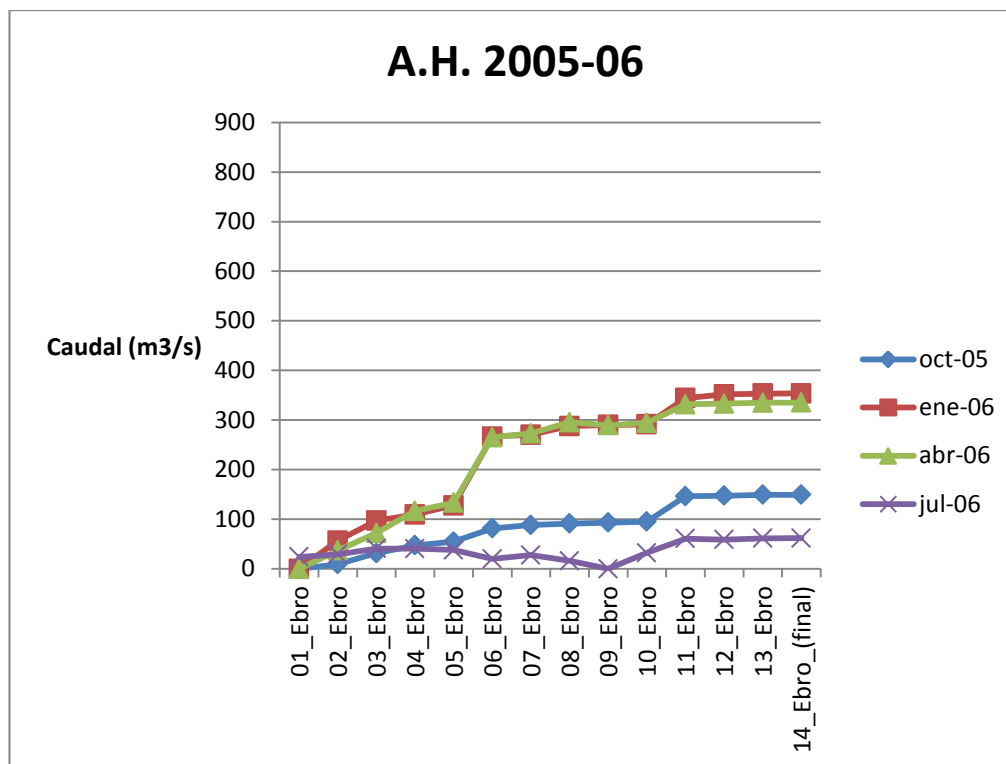
G. 2: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2002-03.



G. 3: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2003-04.



G. 4: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2004-05.



G. 5: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2005-06.

Como puede observarse en las gráficas G.2, G.3, G.4 y G.5, el caudal crece desde el nacimiento del río hasta la desembocadura sin apenas excepciones, siendo este fenómeno mucho más notable en los meses de enero y abril, por ser meses húmedos.

En los años hidrológicos 2002-03 y 2003-04, se puede observar que el caudal en los meses de enero y abril es muchísimo mayor que en el caso de los años hidrológicos 2004-05 y 2005-06. Son años húmedos en el primer caso y años secos en el segundo. Sin embargo, esta diferencia de caudal entre un año húmedo y un año seco no es tan notable en los meses de julio y octubre, por ser el caudal muy escaso, nulo en algún caso. En adelante, para los demás parámetros, solo se plasman en este documento las gráficas correspondientes a los años hidrológicos 2003-04, por ser el más caudaloso, y 2004-05, por ser el más seco.

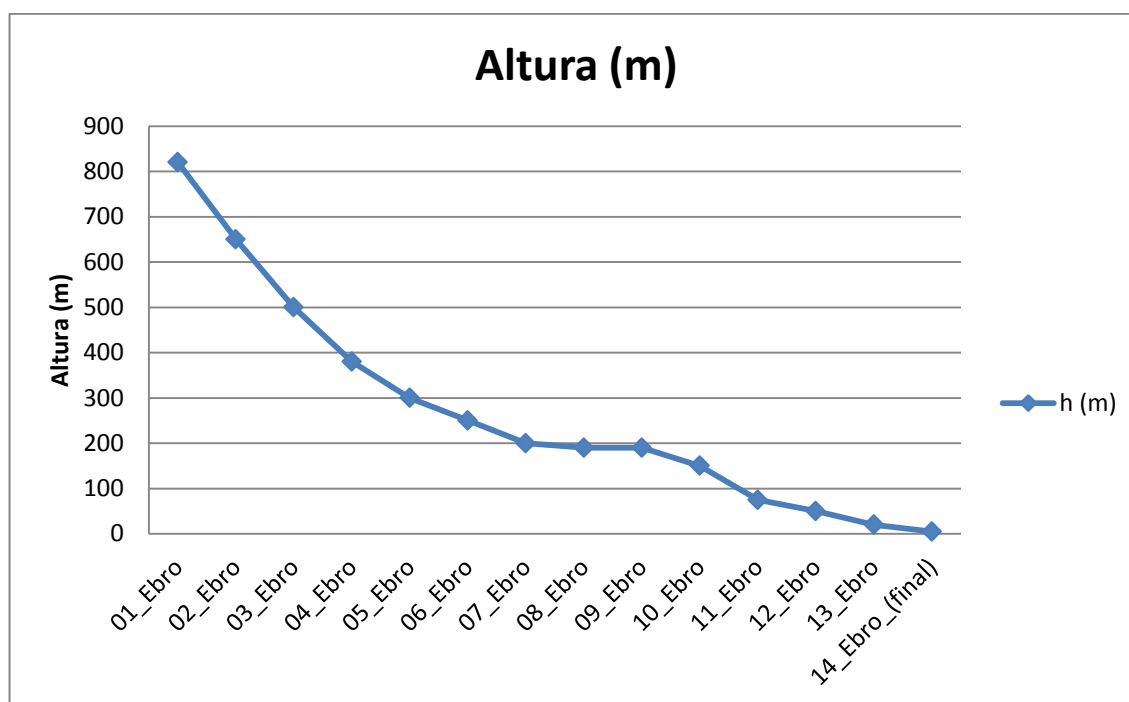
Merece la pena destacar, por otro lado, el salto notable que tiene lugar entre los tramos 5 y 6, y que puede observarse en cualquiera de los años hidrológicos, sobre todo en los meses de enero y abril. Este salto es debido a la desembocadura en el Ebro del Aragón, uno de los grandes afluentes pirenaicos. En esta misma línea se observa entre los tramos 10 y 11 otro salto, correspondiente en este caso a la desembocadura del Segre, el principal de los citados afluentes pirenaicos.

7.2. Variación de los parámetros físico-químicos.

En este apartado se estudia la variación de los parámetros: altura, temperatura, conductividad y COT (Carbono Orgánico Total) a lo largo del tiempo (en la desembocadura), y a lo largo del cauce.

7.2.1. Altura.

En el caso particular de la altura, no existe variación a lo largo del tiempo, por lo que solo se estudia una gráfica con la variación a lo largo del cauce:

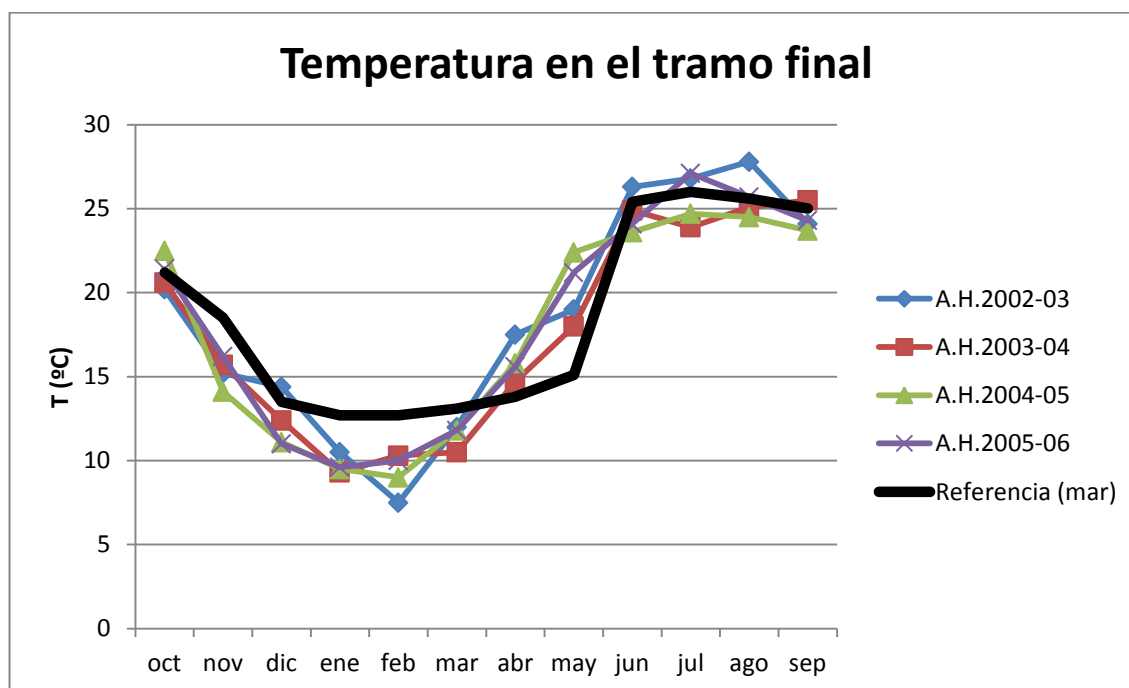


G. 6: Variación de la altura a lo largo del cauce.

Evidentemente, el resultado es el esperado, y desde el nacimiento a la desembocadura, la altura por la que transcurre el río va disminuyendo.

7.2.2. Temperatura.

7.2.2.1. Variación de la temperatura en el tramo final a lo largo del tiempo.

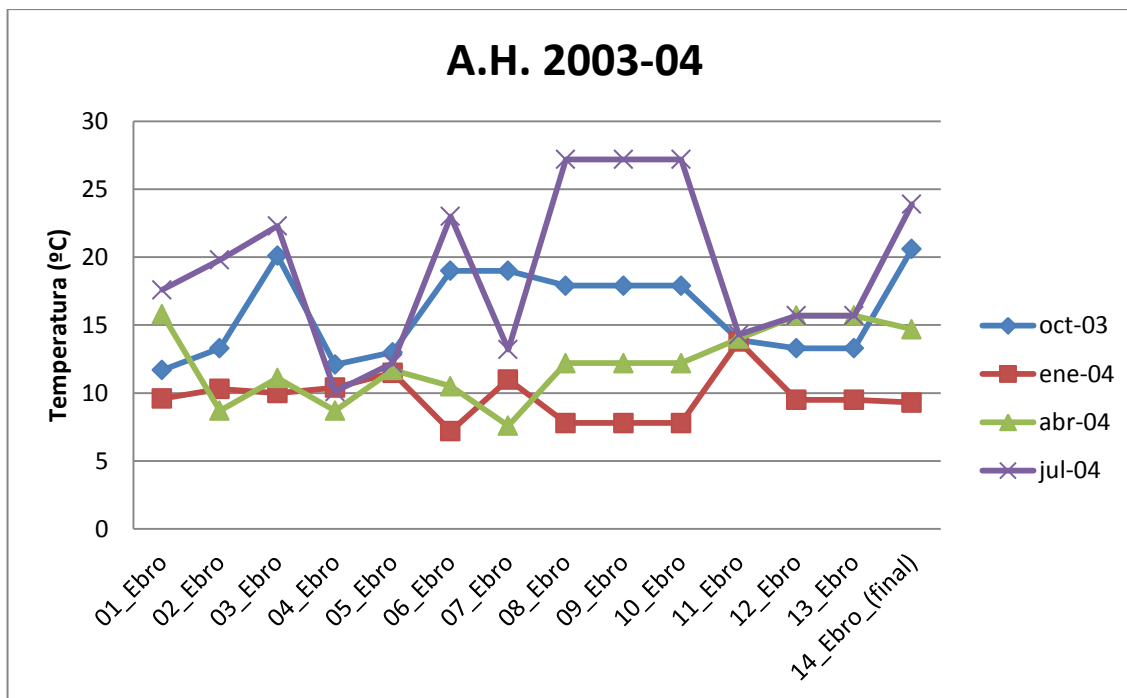


G. 7: Variación de la temperatura en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

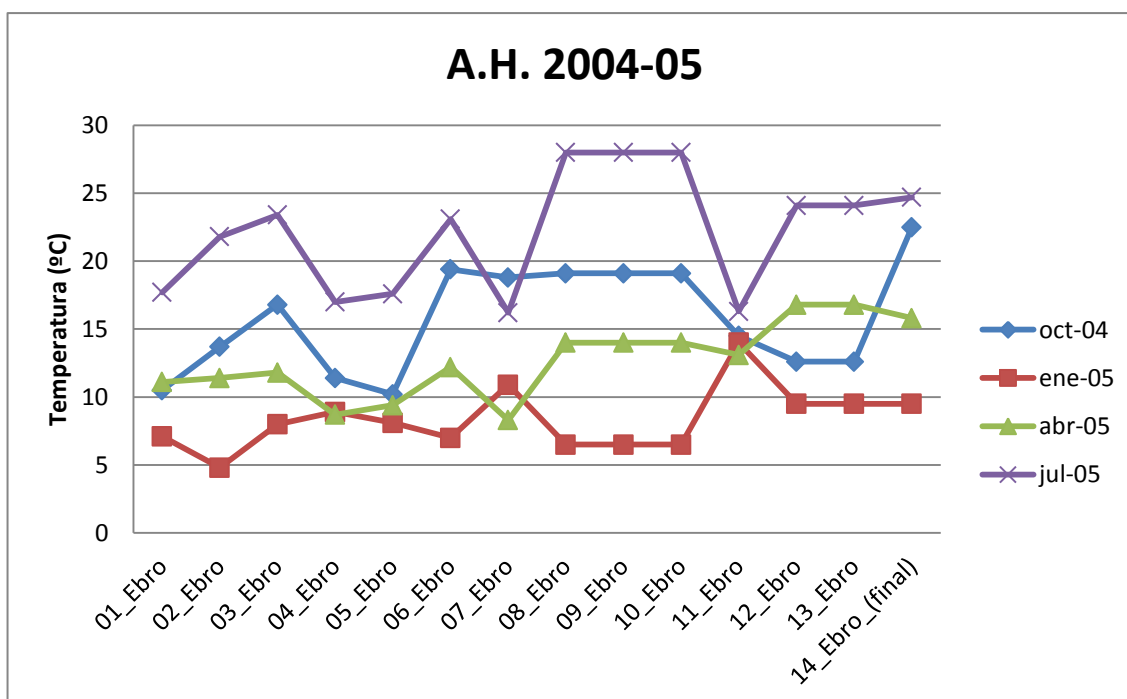
Puede observarse que la temperatura varía a lo largo del año de una forma senoidal, independientemente del año de que se trate. La oscilación máxima de la temperatura del mar es menor que la oscilación de la temperatura del río, esto puede explicarse por la cantidad de masa implicada en cada caso. Evidentemente, cuanto mayor es la cantidad de agua, más tiempo requerirá tanto elevar su temperatura como disminuirla.

Por lo general se observa que las temperaturas mantienen una tendencia muy marcada y similar sea cual sea el año, con lo que hacer pronósticos en este aspecto resulta sencillo y puede conducir al máximo aprovechamiento de las diferencias de temperatura.

7.2.2.2. Variación de la temperatura a lo largo del cauce.



G. 8: Temperatura a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.

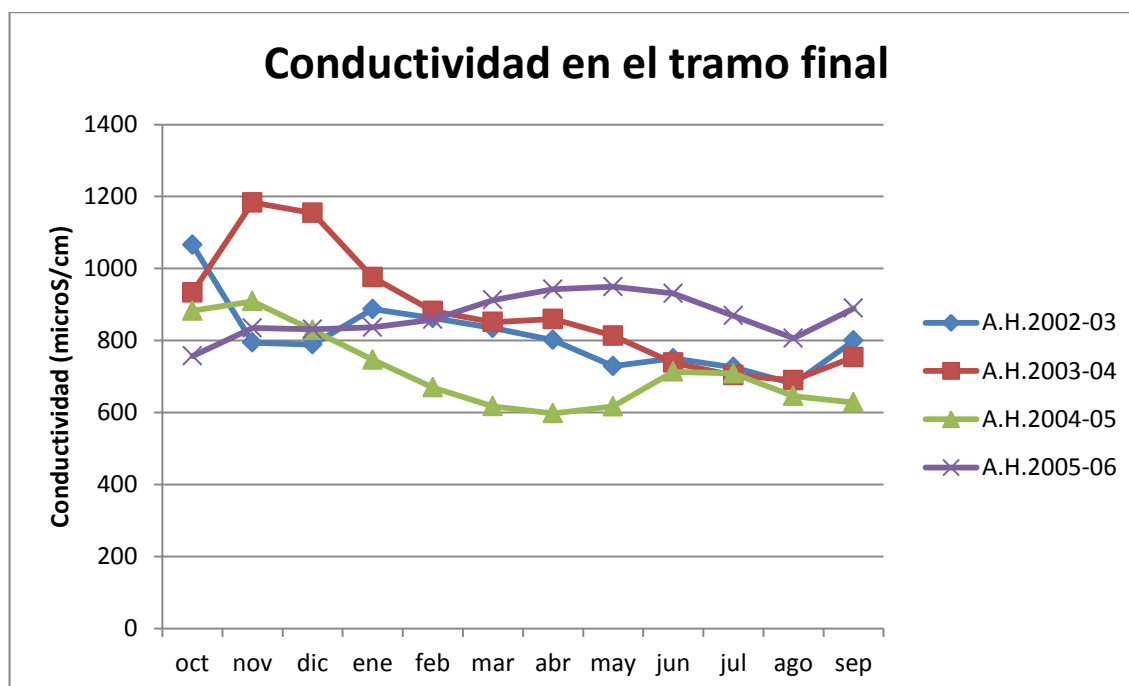


G. 9: Temperatura a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

Tanto en el año húmedo como en el año seco, las líneas obtenidas son prácticamente idénticas. Sin embargo, si se observan los valores, en tres de los cuatro meses, las temperaturas del año seco se encuentran ligeramente por encima de las del año húmedo. Parece lógico que un menor caudal de agua tenga una menor inercia térmica y por tanto se llegue a calentar antes que un caudal mayor. Hay un efecto importante en el embalse de Ribarroja (tramo 11) que uniformiza las temperaturas, que habría que revisar con más detalle de los datos de entrada.

7.2.3. Conductividad.

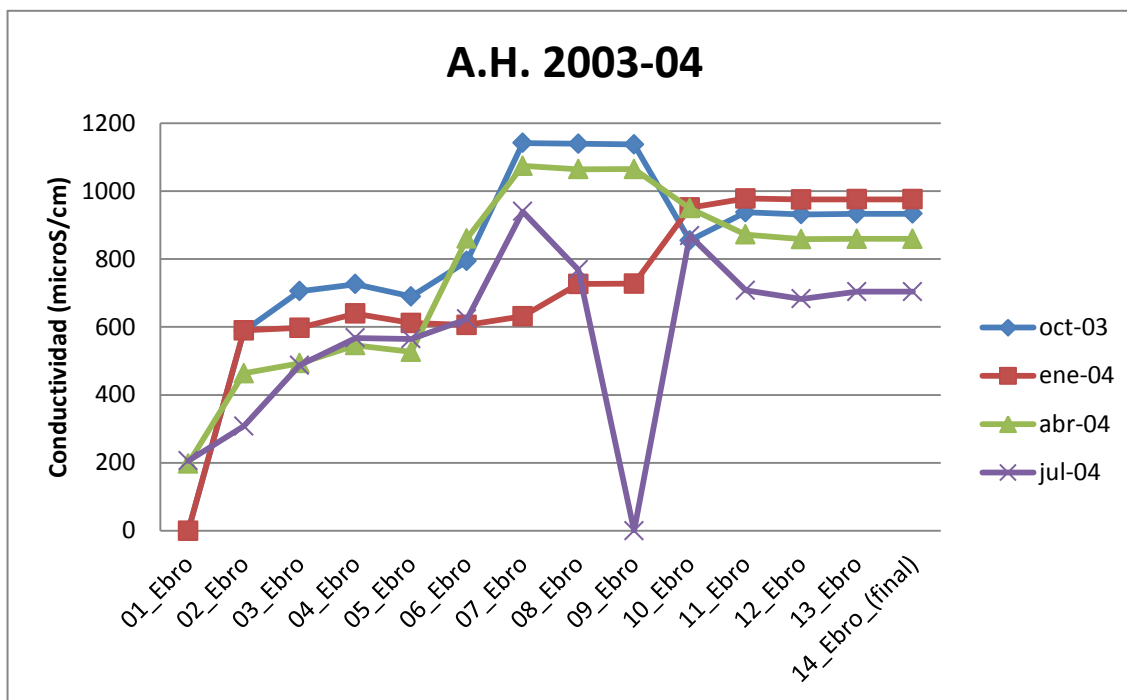
7.2.3.1. Variación de la conductividad en el tramo final a lo largo del tiempo.



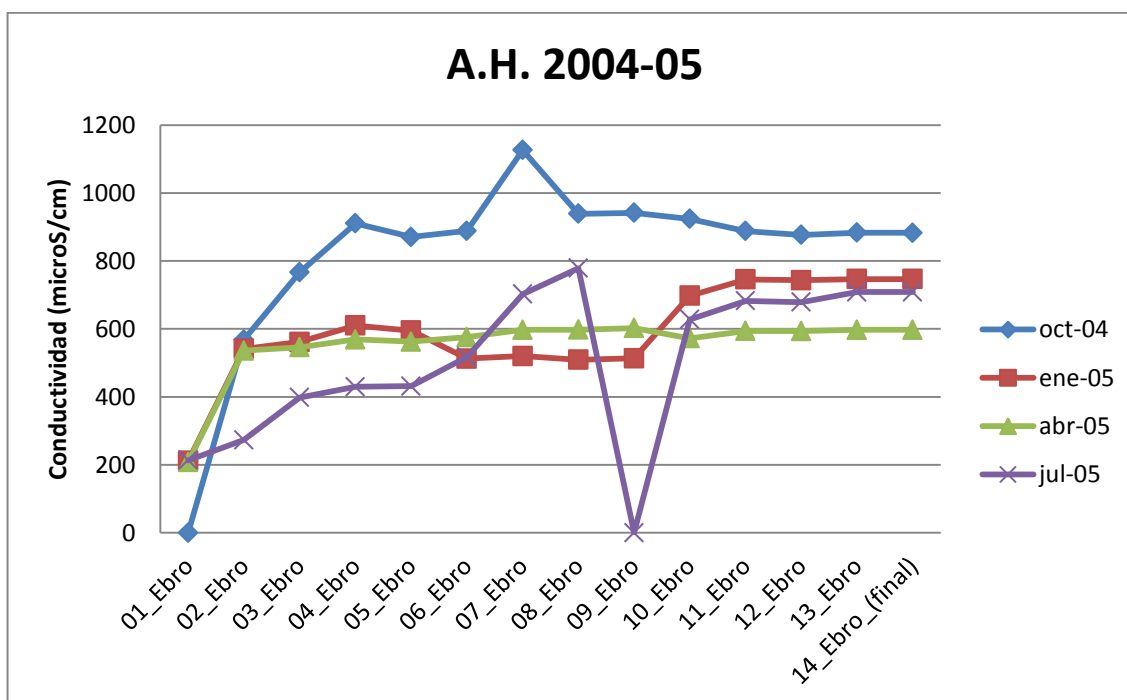
G. 10: Variación de la conductividad en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

Como puede contrastarse mediante la observación de la gráfica G. 10, la conductividad en el tramo final del Ebro sube ligeramente en los períodos de riego, incrementándose la salinidad por el lavado de sales de los suelos yesíferos en el Valle del Ebro.

7.2.3.2. Variación de la conductividad a lo largo del cauce.



G. 11: Conductividad a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.



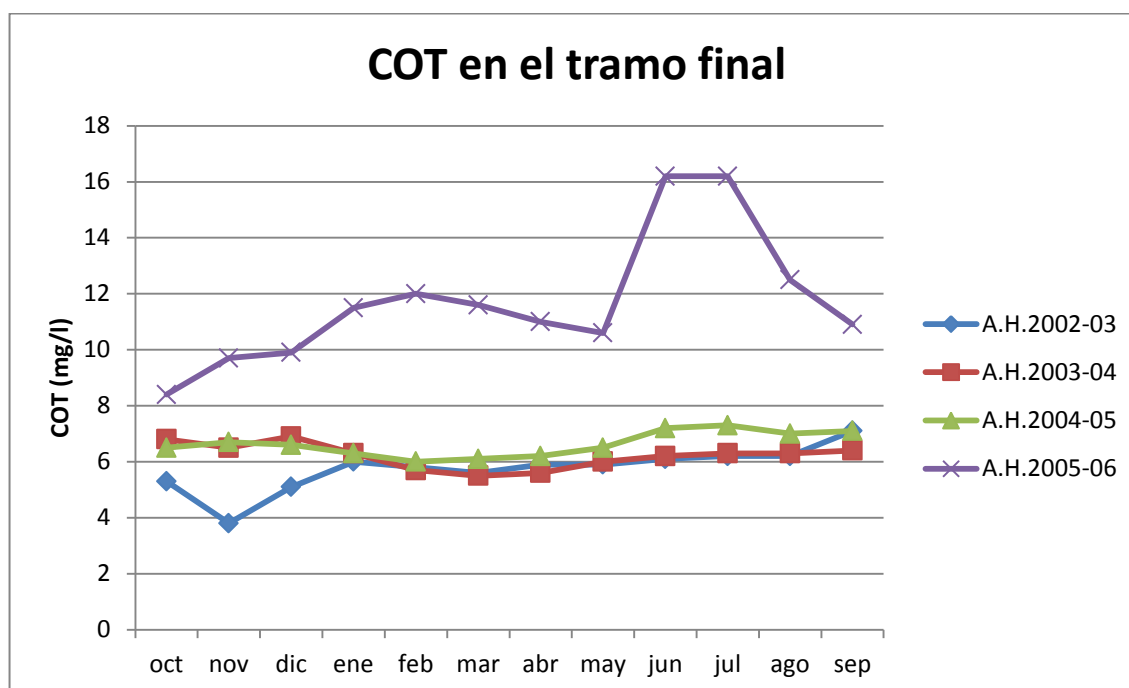
G. 12: Conductividad a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

En primer lugar hay que aclarar el motivo de la aparición de ceros durante algunos meses en los tramos 1 y 9, que ya se ha explicado anteriormente que son debidos al resultado de caudal nulo que otorga la simulación en Aquatool y que es debido a la existencia de embalses en dichos tramos. En adelante se hará referencia a esta explicación cuando aparezca alguno de estos ceros en otras gráficas.

En segundo lugar, entrando a valorar lo que se observa en las gráficas, la conductividad tiene una tendencia creciente por lo general a lo largo del cauce, lo cual es lógico puesto que la concentración de sales aumenta conforme el agua va recorriendo el cauce. En todo caso, la tendencia no está demasiado marcada, debido a que, aunque sí que es cierto que la cantidad de sales aumenta hacia la desembocadura, también ocurre que el caudal crece disminuyendo así la concentración de las citadas sales, por lo que se consigue amortiguar la tendencia y alcanzar determinado equilibrio. Al salir el agua del tramo 14 al mar, el incremento de la conductividad será rotundo.

7.2.4. Carbono Orgánico Total (COT).

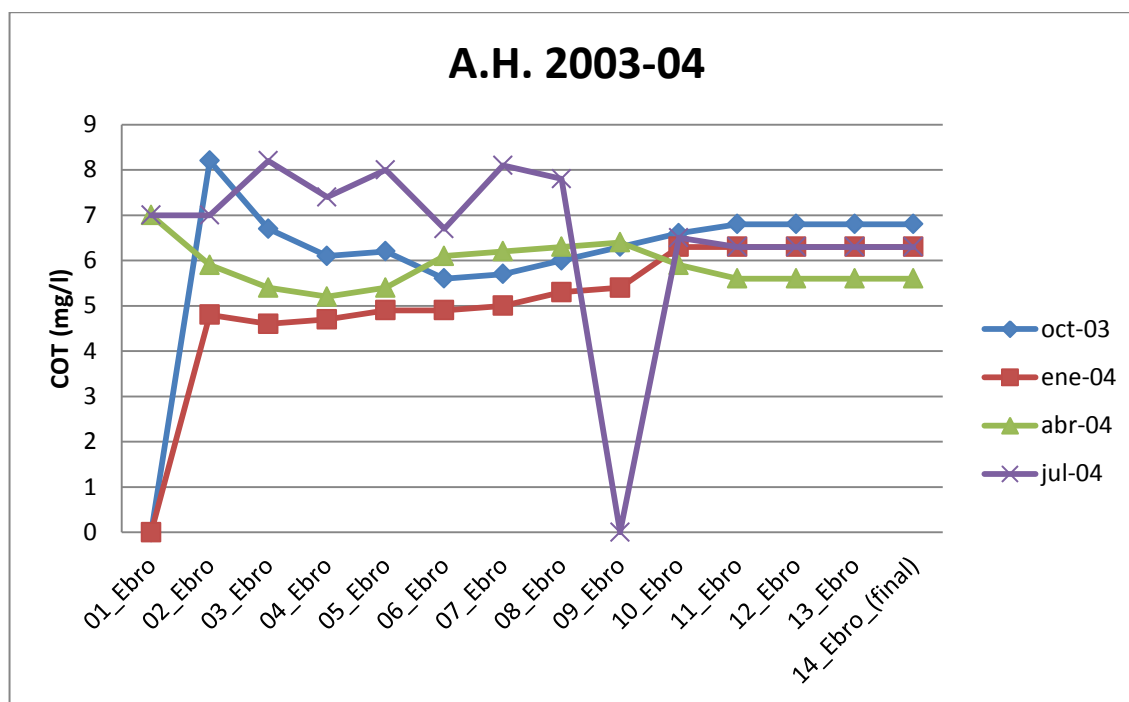
7.2.4.1. Variación del COT en el tramo final a lo largo del tiempo.



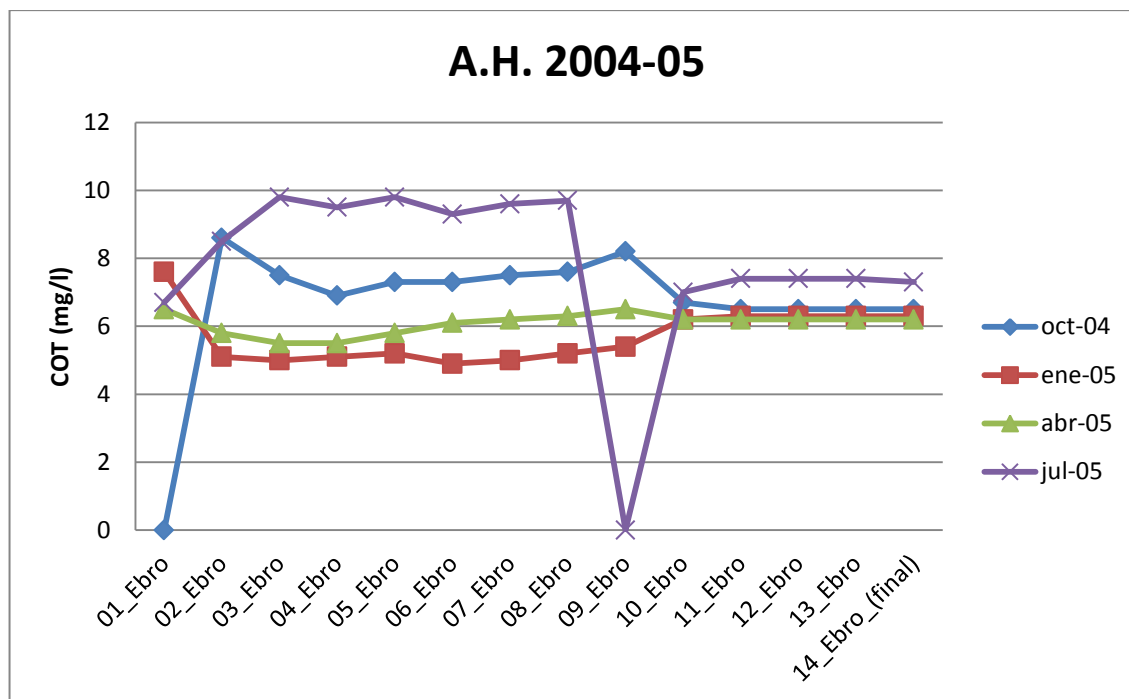
G. 13: Variación del COT en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

Con el COT no parece observarse una dependencia con los meses del año, salvo en el A.H. 2005-06, en el que aparece una ‘meseta’ en los meses de junio y julio con valores de COT justificados por el escaso caudal circulante en dicha época.

7.2.4.2. Variación del TOC a lo largo del cauce.



G. 14: COT a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.



G. 15: COT a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

La explicación para los ceros es la misma que se ha dado en 7.2.3.2 y previamente en 6.2.2.

El COT parece ser constante a lo largo del cauce, el aumento de materia orgánica en el río está compensado por el aumento de caudal, haciendo que las líneas representadas sean prácticamente horizontales. A la llegada del agua del río al mar, el COT se reduce radicalmente a cero.

7.3. Variación de la calidad en términos de exergía específica.

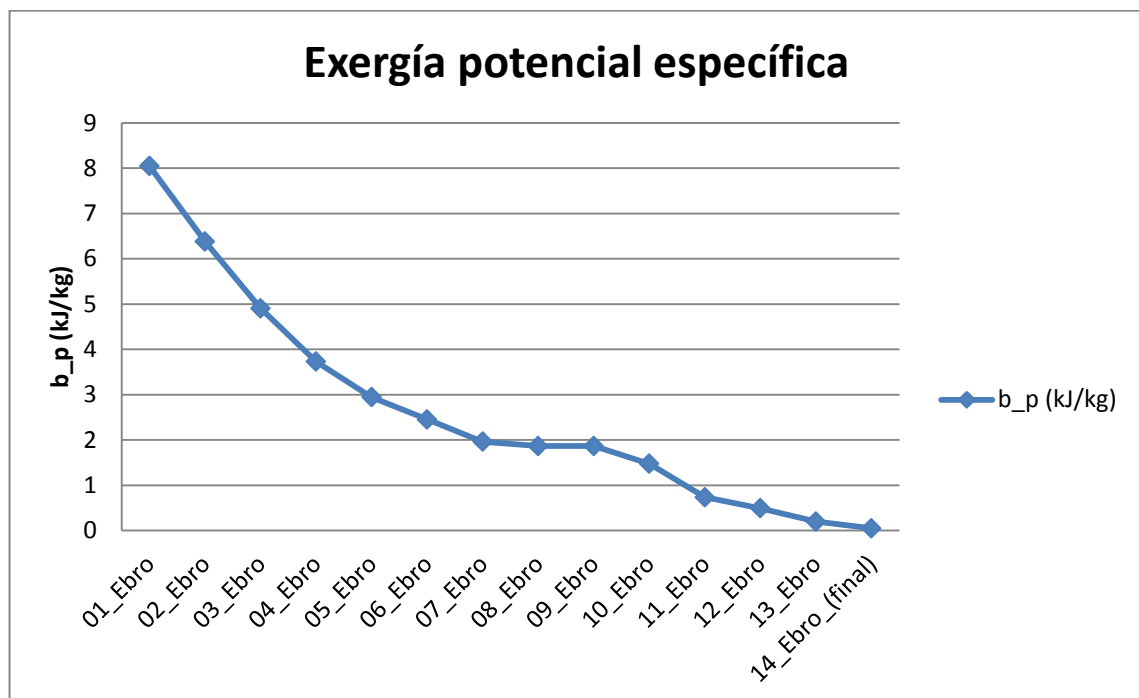
En este apartado se estudia la variación de diferentes términos que componen la exergía específica: exergía potencial específica, exergía térmica específica, exergía química inorgánica específica y exergía química orgánica específica.

Asimismo, también se estudia el comportamiento de los citados términos exergéticos comparándolos con el de los parámetros de los cuales dependen.

7.3.1. Exergía potencial específica.

La exergía potencial específica tiene una característica que la diferencia de todas las demás. Está caracterizada por dos constantes: la aceleración terrestre de la gravedad y la altura de cada tramo, por tanto, independientemente del mes o año que estudiemos, la exergía potencial específica siempre tendrá el mismo perfil a lo largo del cauce. Recordando la Ecuación 4:

$$b_{pot} = g(z - z_0)$$

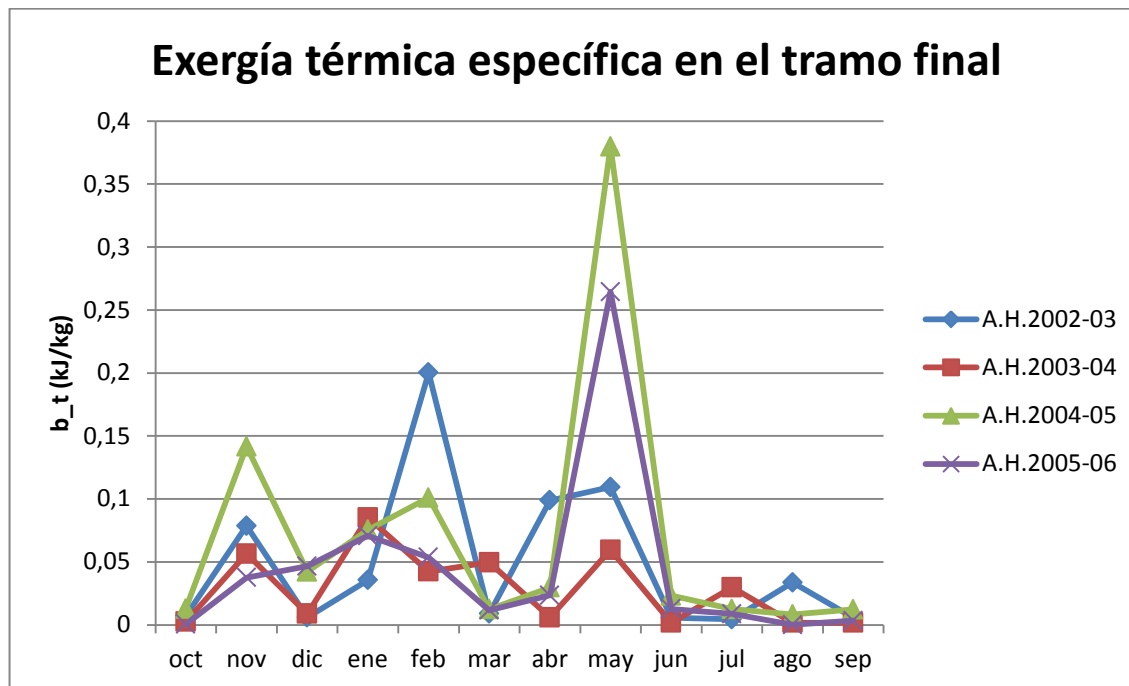


G. 16: Exergía potencial específica a lo largo del cauce del Ebro.

Como era de esperar, el perfil es exactamente análogo al que fue obtenido para la altura en 7.2.1, sin mayor diferencia que la que significa la gravedad g como factor de proporcionalidad.

7.3.2. Exergía térmica específica.

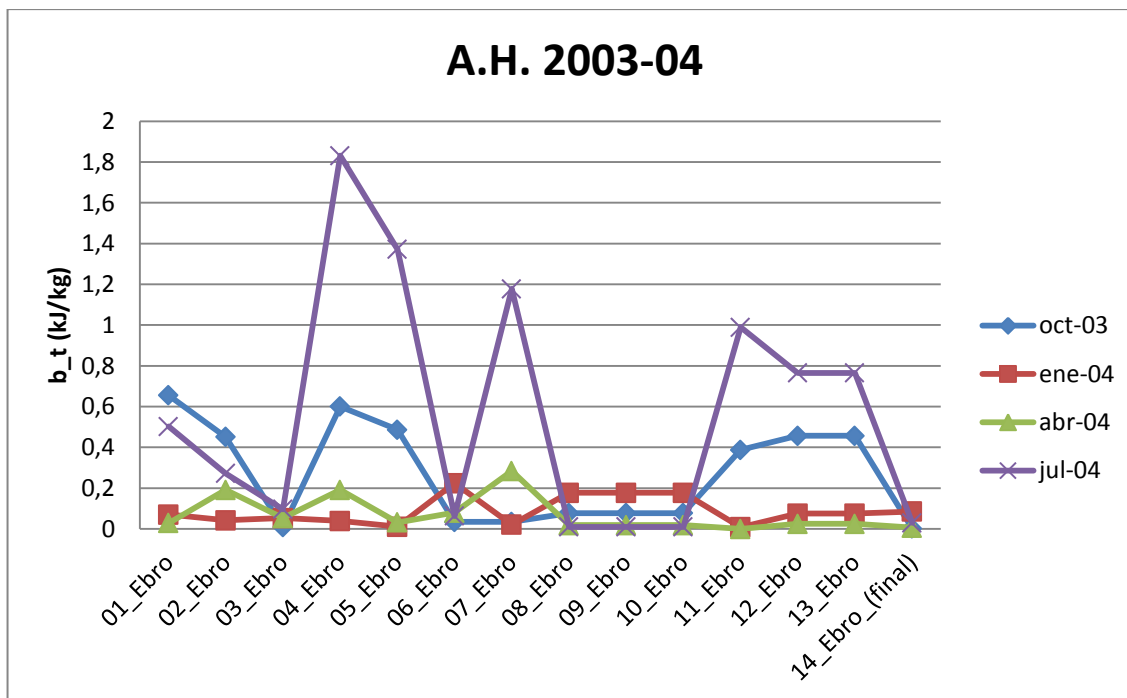
7.3.2.1. Variación de la exergía térmica específica en el tramo final a lo largo del tiempo.



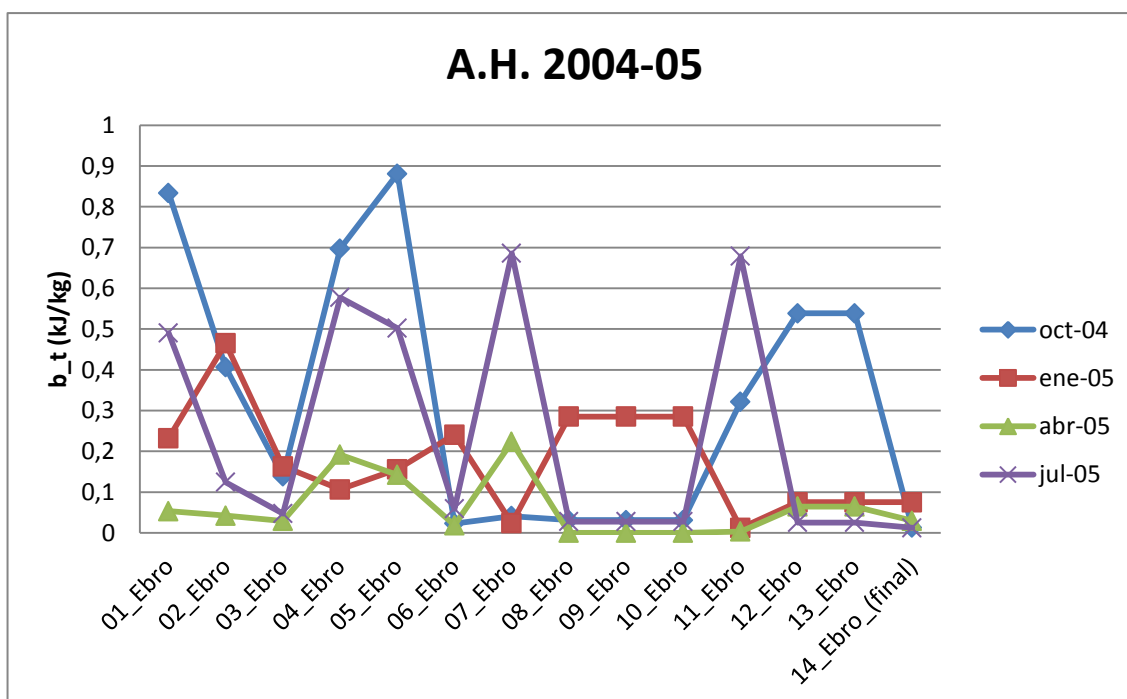
G. 17: Variación de la exergía térmica específica en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

Es muy importante destacar que, pese a que en la gráfica G. 17 todos los resultados son positivos, hay casos en los que la exergía se debe a que el río tiene una temperatura más alta que el ambiente de referencia (mar) y otros casos en los que la exergía se debe a una temperatura menor del río (véase la gráfica de la temperatura G. 7). Los picos de los A.H. 2004-05 y 2005-06 en mayo son ejemplos de lo primero, mientras que el pico del A.H. 2002-03 en febrero es un ejemplo del segundo caso.

7.3.2.2. Variación de la exergía térmica específica a lo largo del cauce.



G. 18: Exergía térmica específica a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.

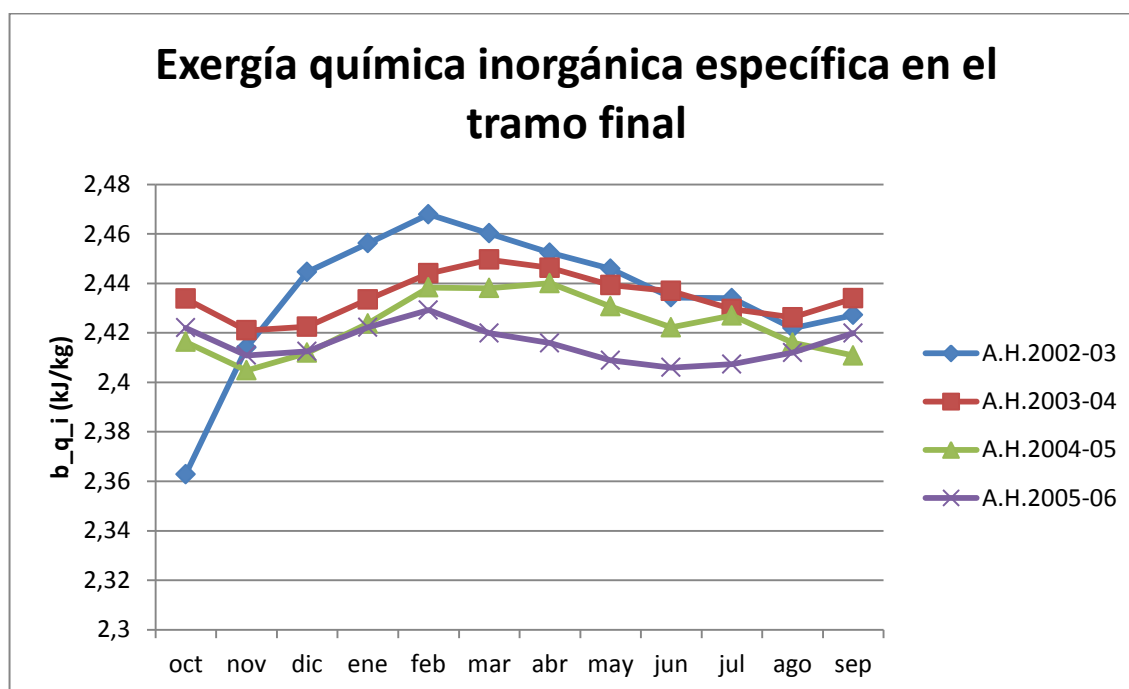


G. 19: Exergía térmica específica a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

Los datos reflejados en las gráficas anteriores y los picos que se observan en determinados tramos algunos meses son consecuentes con los datos de temperatura que se estudiaron en las gráficas correspondientes. Cada gradiente de temperatura elevado entre el río y el ambiente de referencia ha conducido ahora a la obtención de un pico en las gráficas de exergía.

7.3.3. Exergía química inorgánica específica.

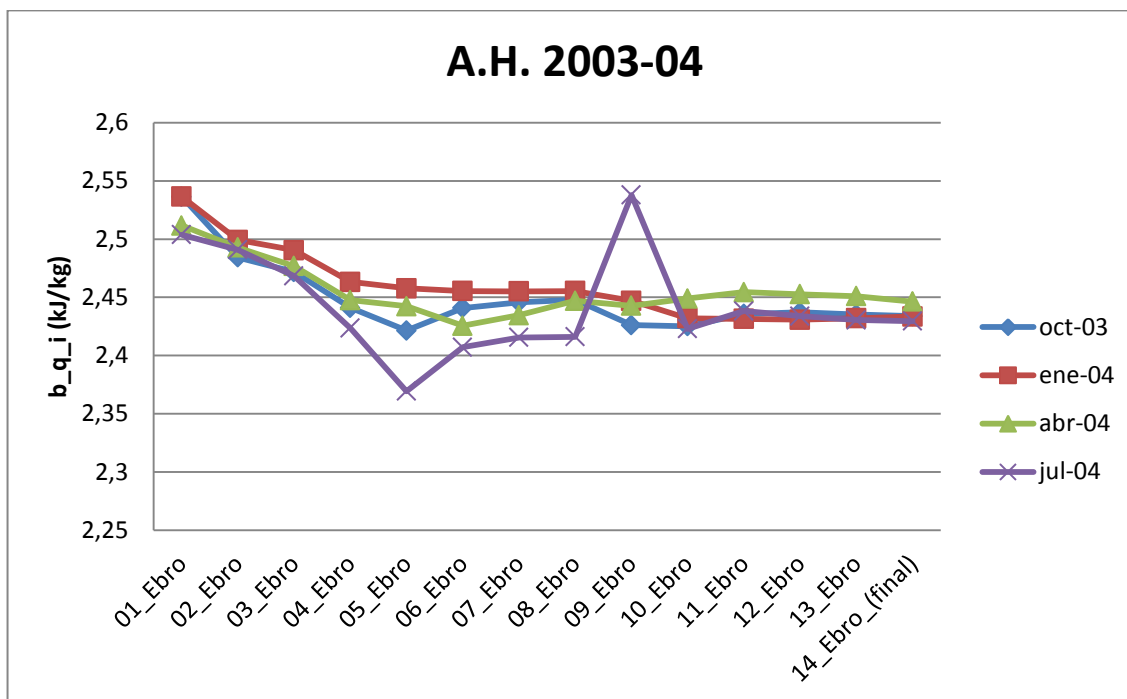
7.3.3.1. Variación de la exergía química inorgánica específica en el tramo final a lo largo del tiempo.



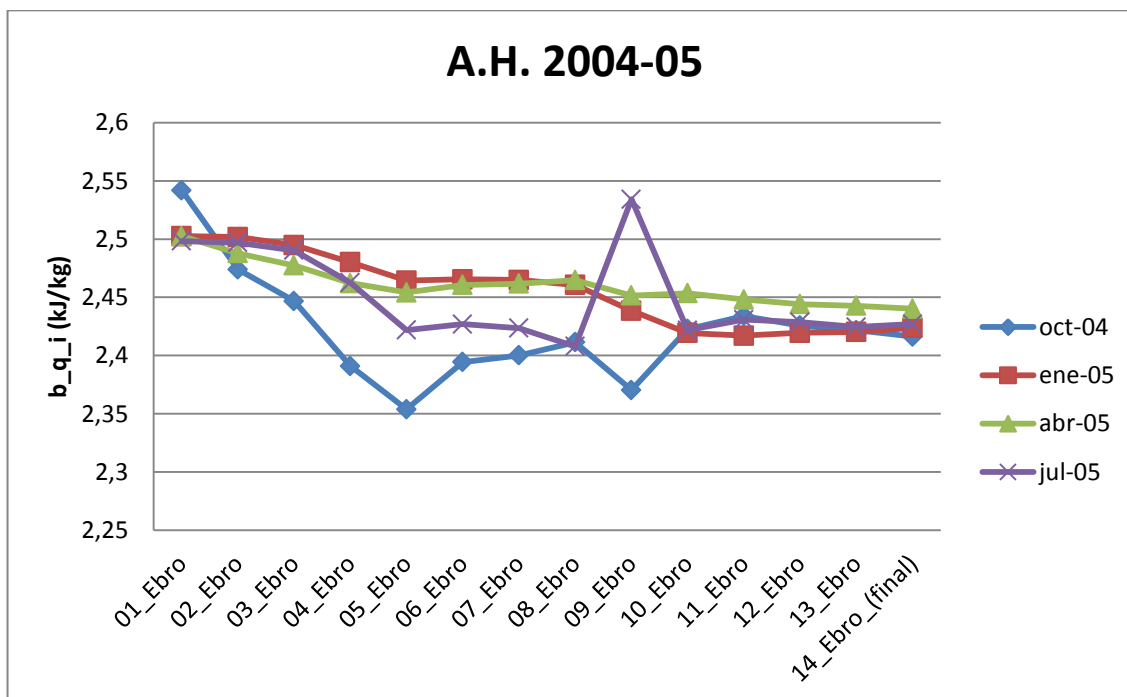
G. 20: Variación de la exergía química inorgánica específica en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

La exergía química en el tramo final es algo mayor en períodos de elevado caudal (febrero-abril), que suponen en general una menor salinidad.

7.3.3.2. Variación de la exergía química inorgánica específica a lo largo del cauce.



G. 21: Exergía química inorgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.

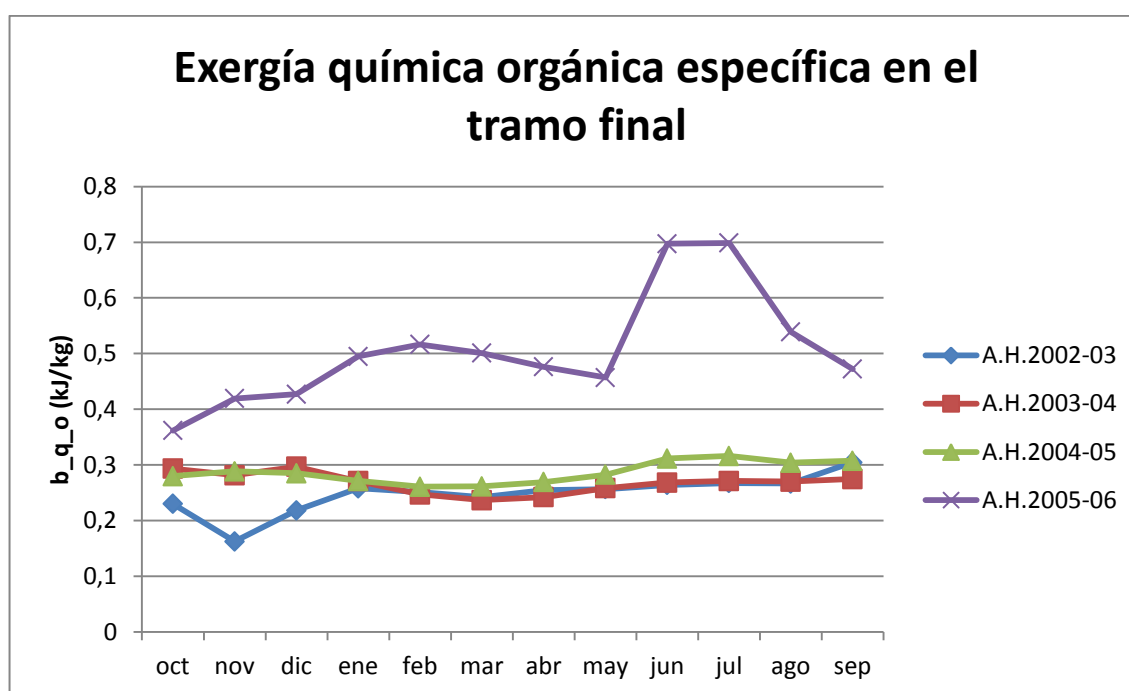


G. 22: Exergía química inorgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

La exergía química inorgánica específica disminuye a lo largo del cauce en tanto que la conductividad aumenta, como se puede advertir en las gráficas G.21 y G.22 respectivamente para dos años hidrológicos distintos.

7.3.4. Exergía química orgánica específica.

7.3.4.1. Variación de la exergía química orgánica específica en el tramo final a lo largo del tiempo.

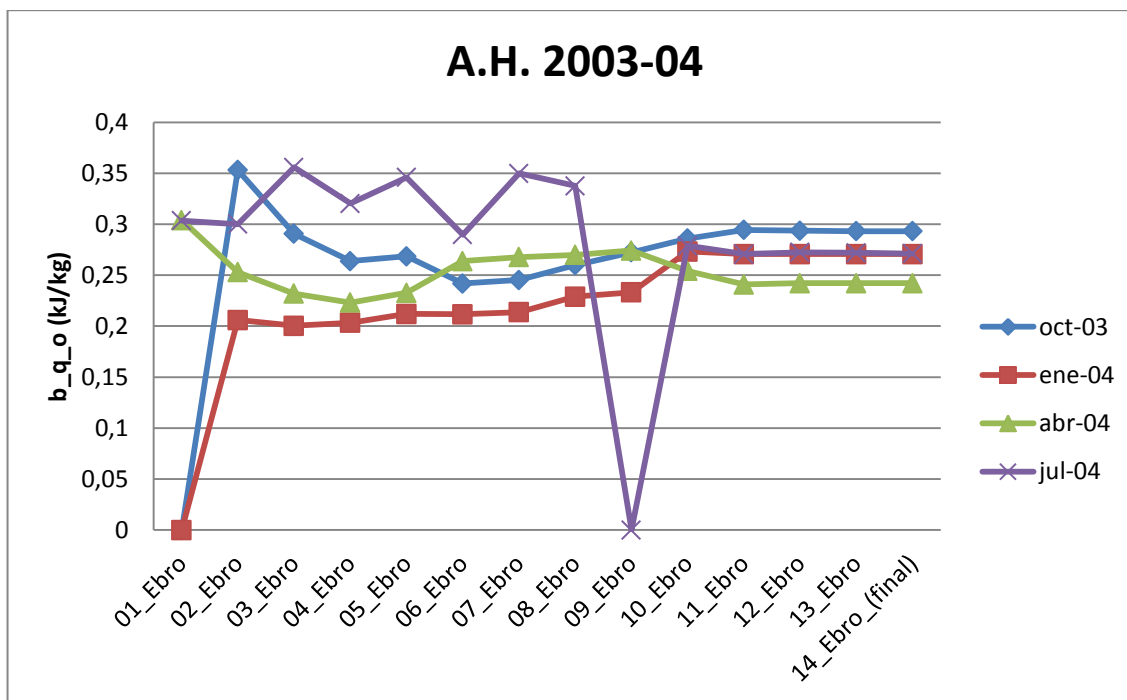


G. 23: Variación de la exergía química orgánica específica en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

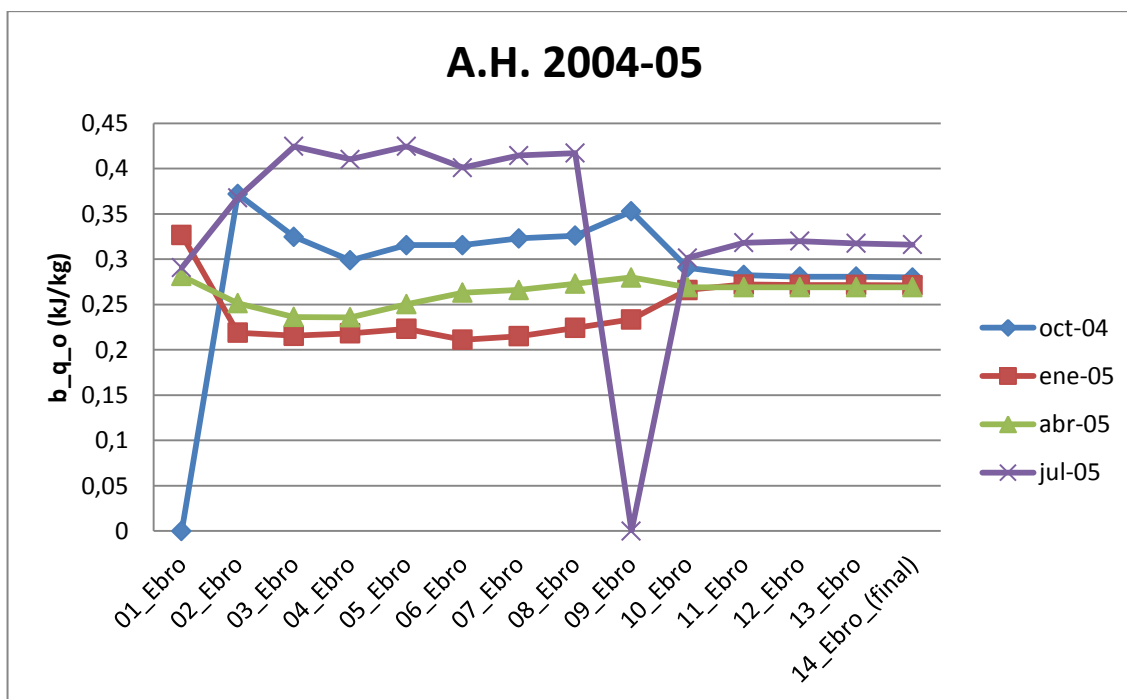
Esta gráfica es idéntica a la estudiada para el COT, debido a que la fórmula para pasar de uno a otra implica un simple factor de proporcionalidad. Las reflexiones hechas previamente para el COT sirven igualmente en este caso.

Lo mismo ocurre para las gráficas del siguiente apartado.

7.3.4.2. Variación de la exergía química orgánica específica a lo largo del cauce.



G. 24: Exergía química orgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.



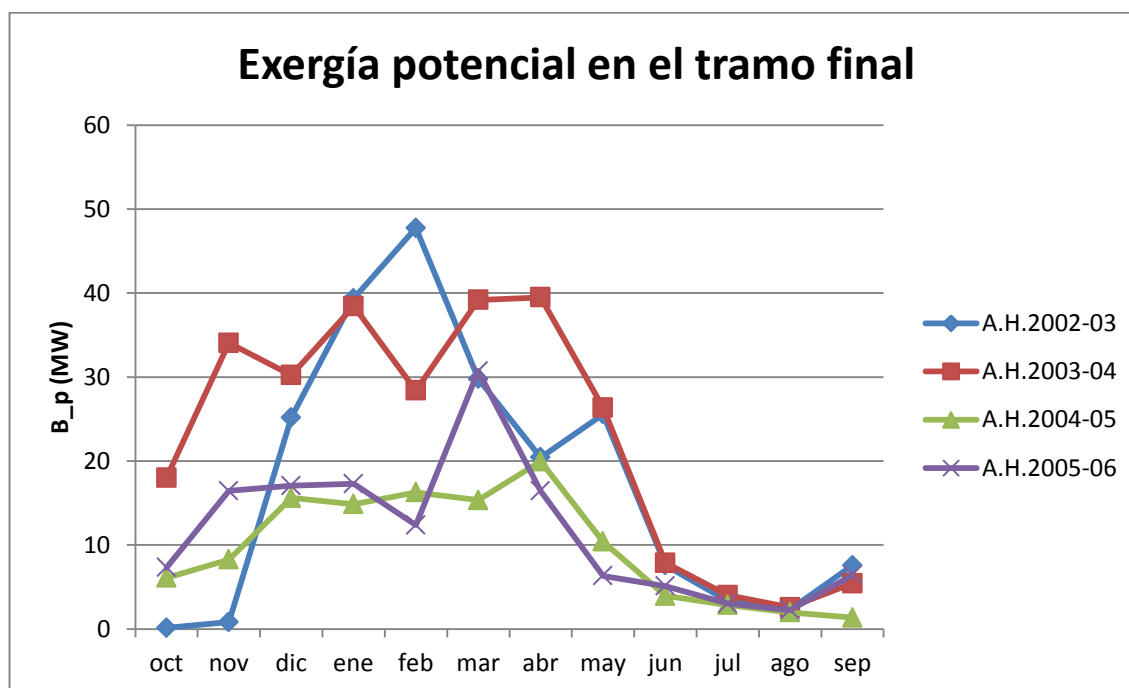
G. 25: Exergía química orgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

7.4. Variación de componentes absolutas de la exergía.

En este apartado se estudia la variación de diferentes términos que componen la exergía, teniendo en cuenta en esta ocasión la cantidad y la calidad de forma simultánea. Las magnitudes están expresadas en unidades de potencia.

7.4.1. Exergía potencial absoluta.

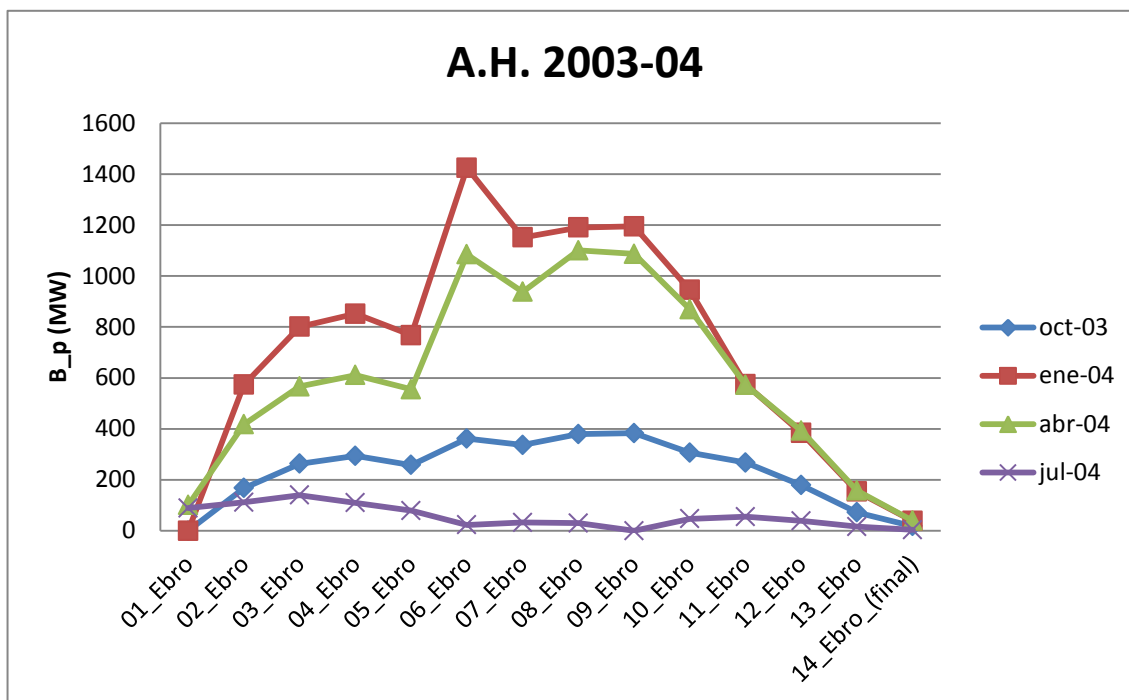
7.4.2.1. Variación de la exergía potencial absoluta en el tramo final a lo largo del tiempo.



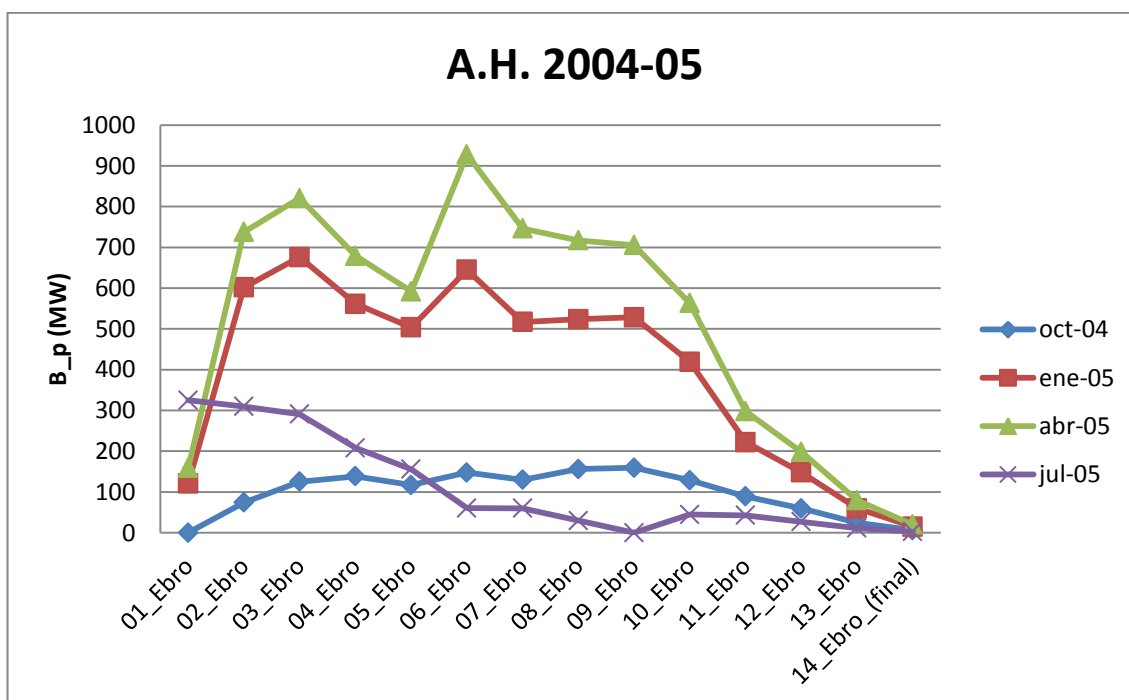
G. 26: Variación de la exergía potencial absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

Esta gráfica es semejante a la gráfica G.1 obtenida en el apartado 7.1.1. Esto tiene una sencilla explicación: la exergía potencial específica es constante durante todo el tramo, como ya se ha explicado anteriormente (7.3.1). Así pues, todo fenómeno que pudiera comentarse acerca de esta gráfica ha sido explicado previamente en 7.1.1.

7.4.2.2. Variación de la potencial absoluta a lo largo del cauce.



G. 27: Exergía potencial absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.



G. 28: Exergía potencial absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

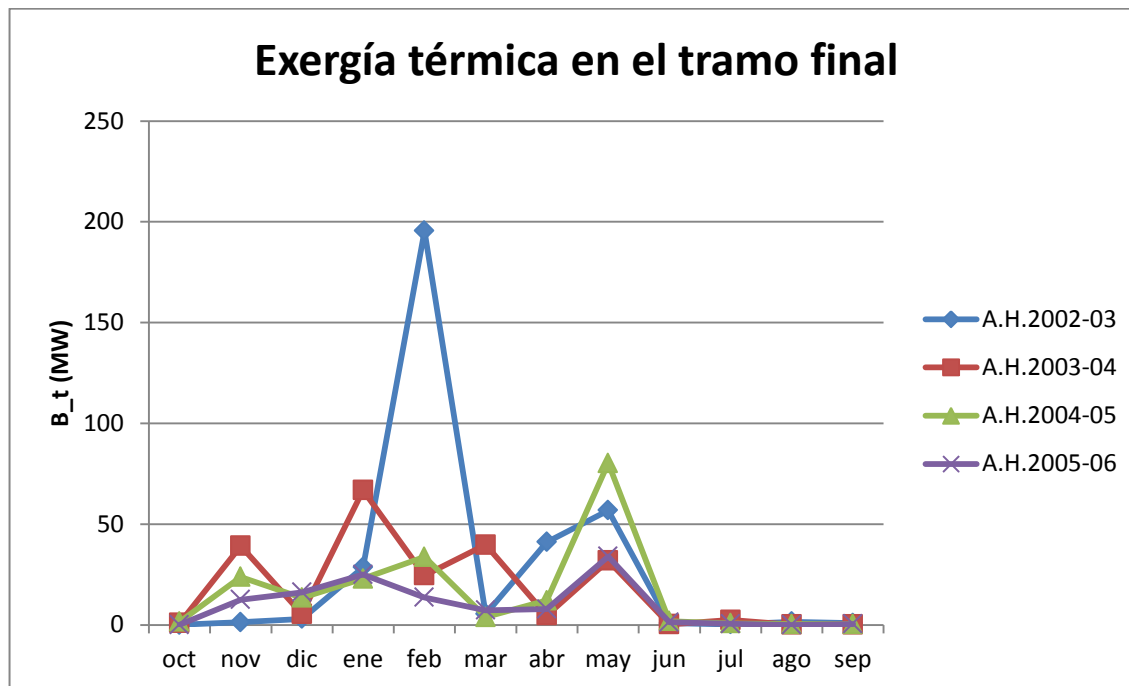
Obsérvese que las gráficas anteriores tienen una forma -casi- parabólica, resultado del producto $Q \cdot b$, variable -casi- linealmente ascendente multiplicada por variable -casi- linealmente descendente.

Se puede comprobar también la importancia del caudal en esta magnitud, puesto que los años húmedos alcanzan valores muy superiores a los años secos.

Evidentemente, se alcanzan máximos en los tramos medios, donde tanto el caudal como la exergía potencial específica hacen su aportación. Sin embargo, tanto el nacimiento como la desembocadura tienen valores nulos o cercanos al cero, lo que tiene todo el sentido ya que en el nacimiento el caudal es nulo o prácticamente nulo y en la desembocadura la exergía potencial específica es nula.

7.4.2. Exergía térmica absoluta.

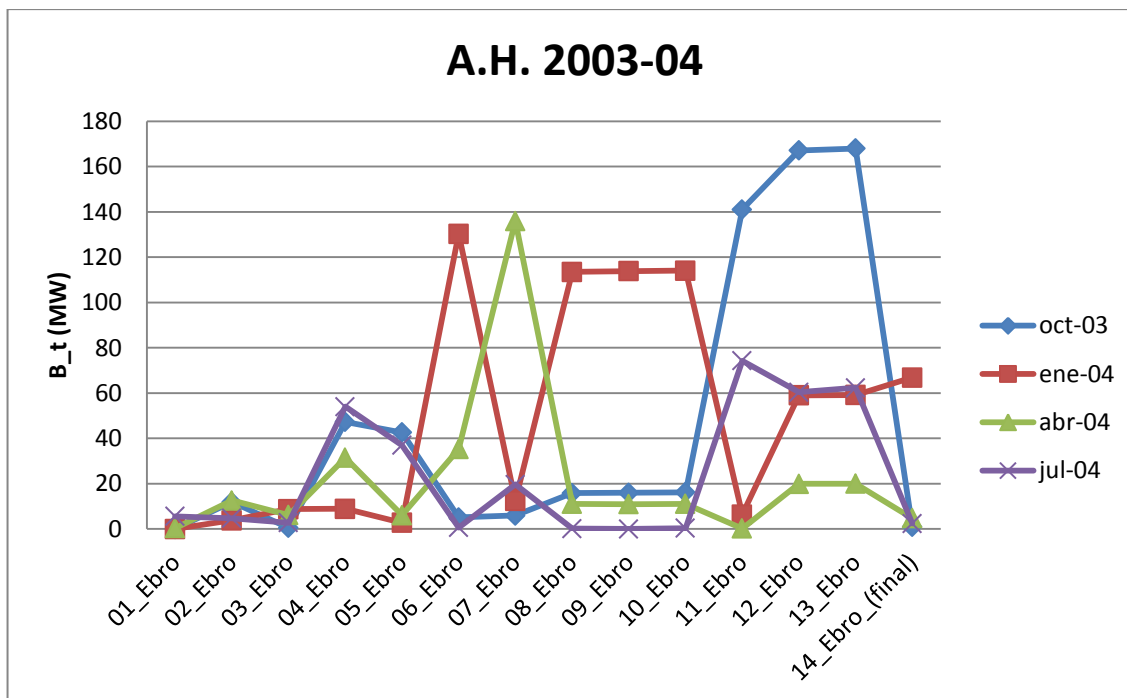
7.4.2.1. Variación de la exergía térmica absoluta en el tramo final a lo largo del tiempo.



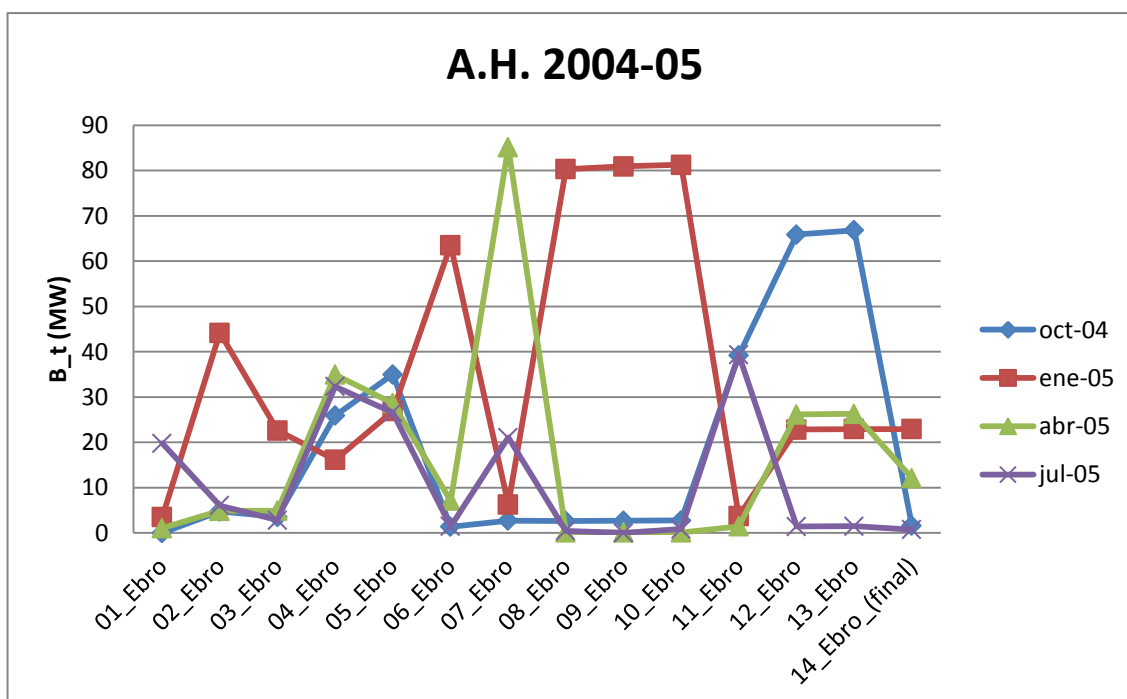
G. 29: Variación de la exergía térmica absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

El aspecto más importante a destacar sobre esta gráfica es el siguiente: recuérdese la gráfica G.17 del apartado 7.3.2, en la que se puede observar un gran pico en mayo del A.H. 2004-05 y un pico algo menor en febrero del año 2002-03. En esta ocasión, el pico de mayo ha disminuido notablemente, mientras que el pico de febrero ha aumentado de forma considerable. El motivo es la contribución del caudal, que es muy elevado en el mes de febrero del A.H. 2002-03 (año húmedo) y muy escaso en el mes de mayo del A.H. 2004-05 (año seco).

7.4.2.2. Variación de la exergía térmica absoluta a lo largo del cauce.



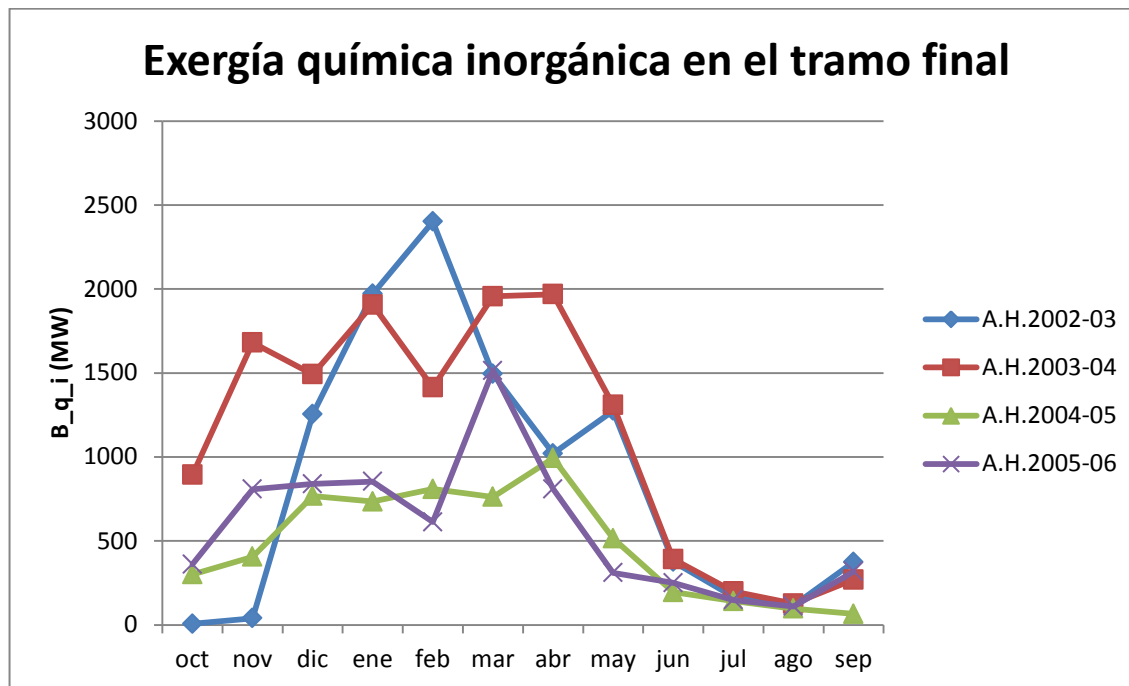
G. 30: Exergía térmica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.



G. 31: Exergía térmica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

7.4.3. Exergía química inorgánica absoluta.

7.4.3.1. Variación de la exergía química inorgánica absoluta en el tramo final a lo largo del tiempo.

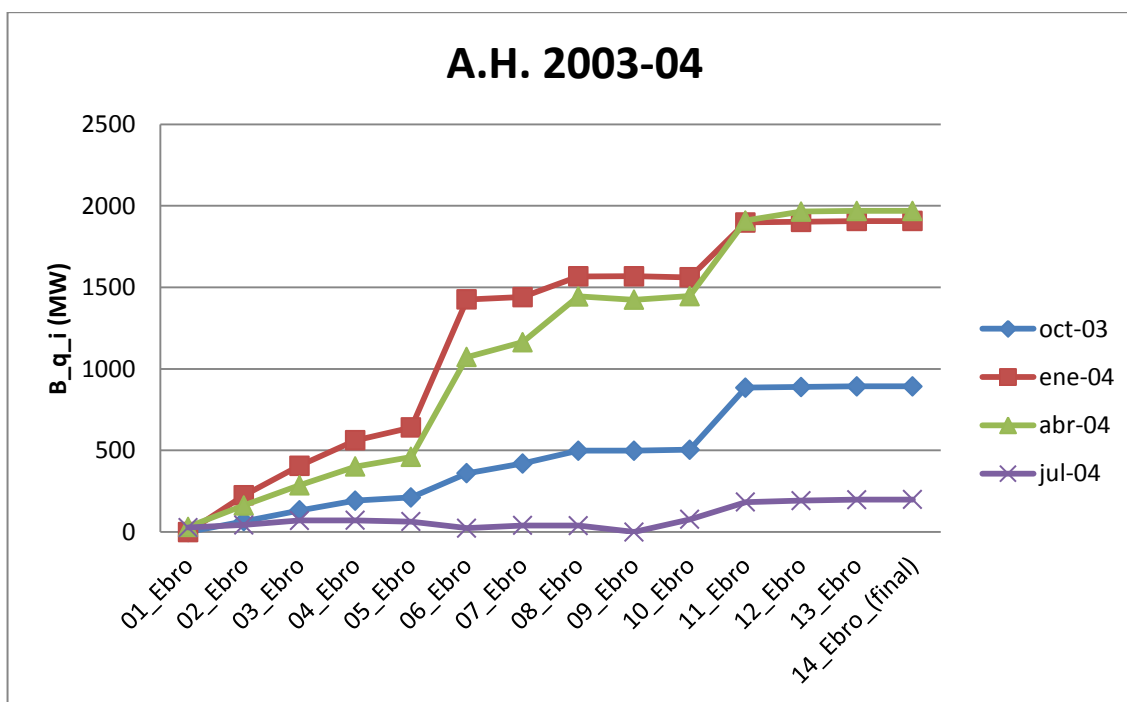


G. 32: Variación de la exergía química inorgánica absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

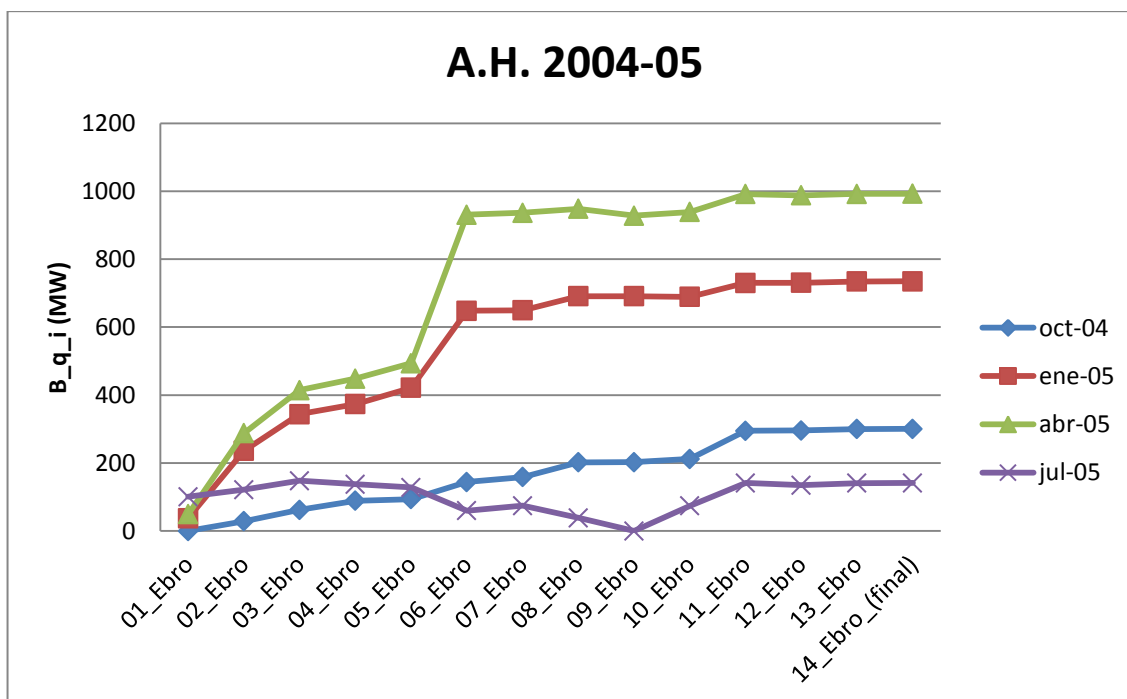
La anterior gráfica tiene la forma determinada por el caudal, ya que la contribución que hace la exergía inorgánica específica es mucho menor, por tanto, cada tendencia o salto puede explicarse de la misma forma que se explican en 7.1.

Esto es aplicable a las gráficas del siguiente apartado.

7.4.3.2. Variación de la exergía química inorgánica absoluta a lo largo del cauce.



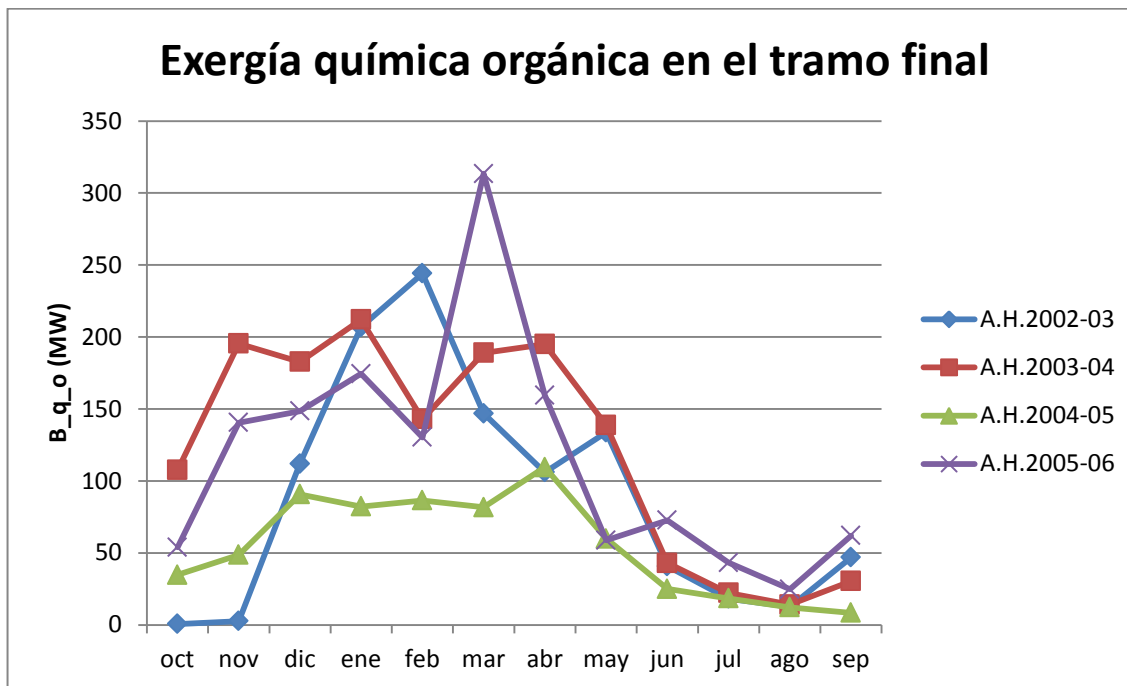
G. 33: Exergía química inorgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.



G. 34: Exergía química inorgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

7.4.4. Exergía química orgánica absoluta.

7.4.4.1. Variación de la exergía química orgánica absoluta en el tramo final a lo largo del tiempo.

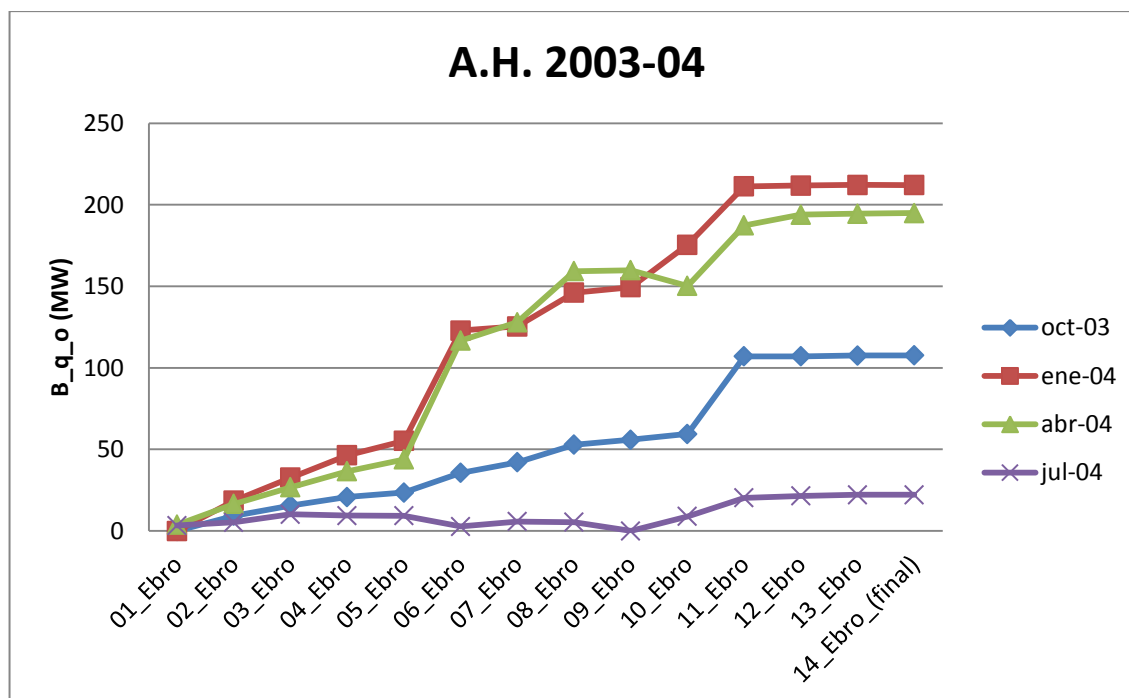


G. 35: Variación de la exergía química orgánica absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.

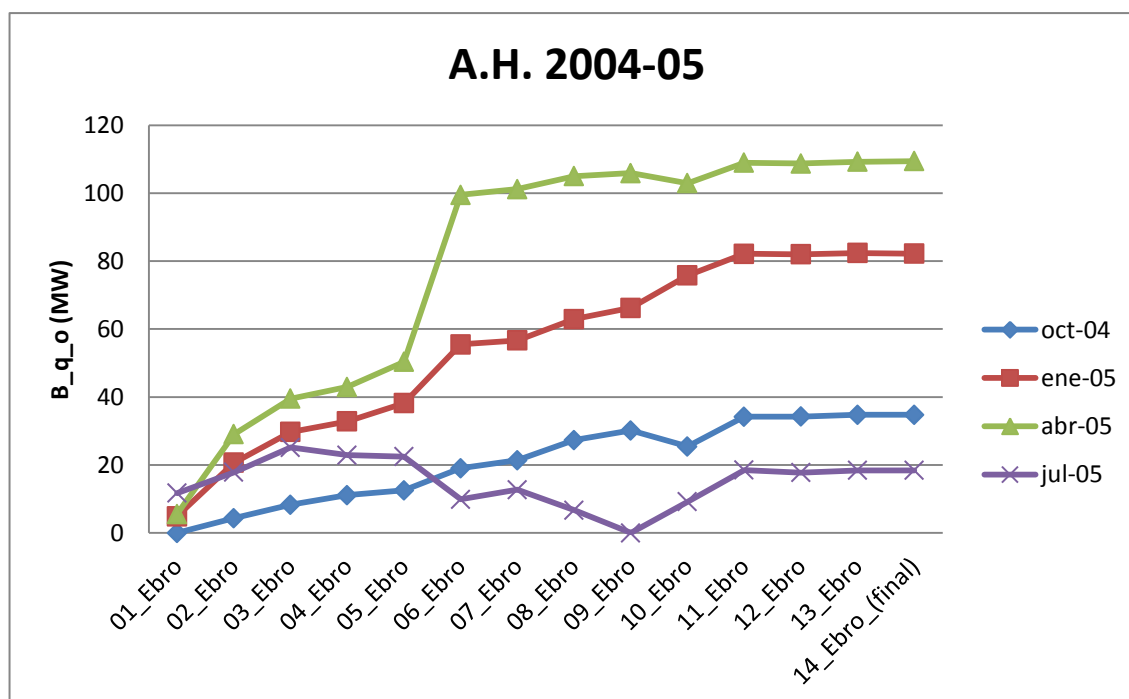
La anterior gráfica tiene la forma determinada por el caudal, ya que la contribución que hace la exergía inorgánica específica es mucho menor, por tanto, cada tendencia o salto puede explicarse de la misma forma que se explican en 7.1.

Esto es aplicable a las gráficas del siguiente apartado.

7.4.4.2. Variación de la exergía química orgánica absoluta a lo largo del cauce.



G. 36: Exergía química orgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.



G. 37: Exergía química orgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.

7.5. Perfiles. Resumen de resultados de la integración a lo largo del cauce.

Una vez definidos los parámetros del río, se puede obtener el perfil discreto de cada componente de la exergía de un río. Como hay varios términos significativos (potencial, térmica, química inorgánica, química orgánica), se presenta un perfil correspondiente a cada uno. Cuanta más información se tenga a disposición, más exacta será la representación del perfil. Lo ideal sería un continuo, pero no es factible. Los datos reales proveen de una base discreta de datos que conduce a un perfil discreto del río (Figura 41) (Martínez, 2009).

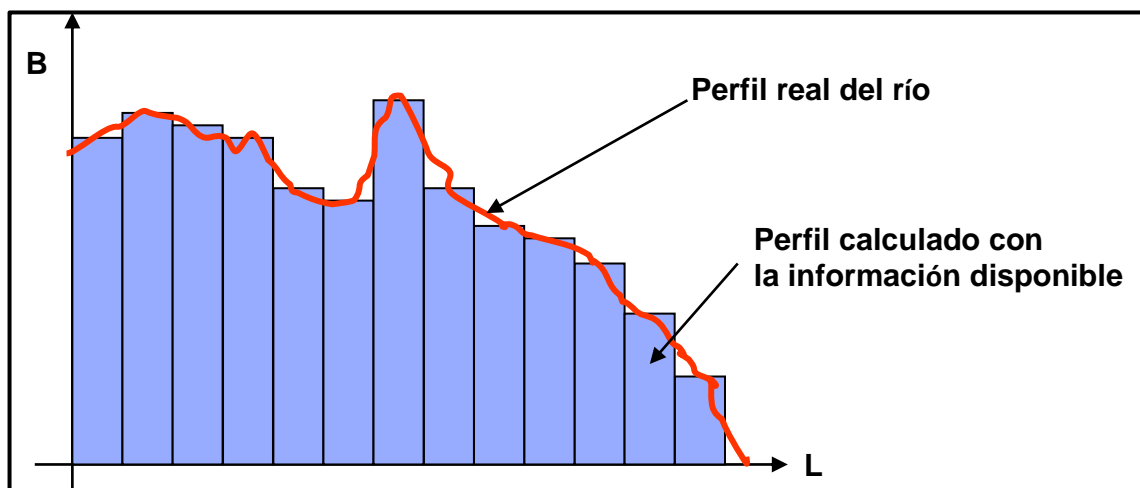


Figura 38: Perfil real del río y perfil discreto calculado (Martínez, 2009).

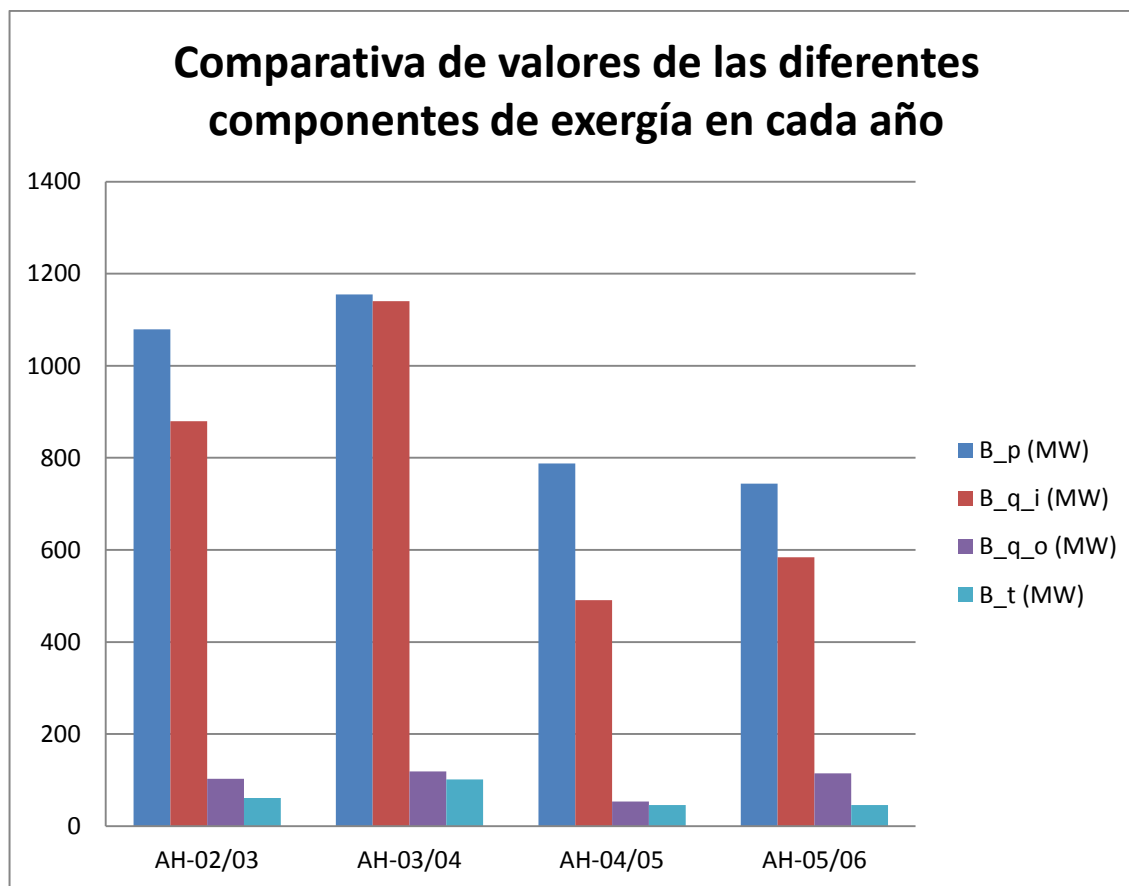
A continuación se muestra un resumen, en forma de tablas, de los resultados obtenidos para los distintos componentes de exergía calculados. La Tabla 9 muestra los datos resultado de sumar todos los tramos del río Ebro, para cada mes, y en cada año hidrológico en unidades de potencia, mientras que la Tabla 10 hace lo propio en unidades de energía.

Tabla 9: Resumen de los resultados en los cálculos de exergía en unidades de potencia (MW).

B_P (MW)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	MEDIA ANUAL	B_P (MW)	Mín.	Máx.
AH-02/03	214,2	311,0	1978,8	2703,7	2819,0	1531,0	1132,8	1233,5	304,6	292,2	163,9	263,8	1079,0	AH-02/03	163,9	2819,0
AH-03/04	797,9	1355,8	1455,5	2273,5	1526,8	2244,3	1986,1	1257,8	282,5	201,9	216,3	249,3	1154,0	AH-03/04	201,9	2273,5
AH-04/05	319,7	606,9	1219,3	1226,4	1453,2	1381,8	1592,7	734,5	191,5	358,0	281,7	72,2	786,5	AH-04/05	72,2	1592,7
AH-05/06	377,7	1075,6	1185,7	1087,1	823,6	1940,8	1026,8	388,2	237,8	261,5	285,6	232,5	743,6	AH-05/06	232,5	1940,8
B_Q_I (MW)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	MEDIA ANUAL	B_Q_I (MW)	Mín.	Máx.
AH-02/03	2,9	30,8	1281,1	1989,9	2414,1	1496,2	1023,6	1278,2	379,0	168,1	115,8	375,5	879,6	AH-02/03	2,9	2414,1
AH-03/04	897,9	1687,5	1506,6	1930,8	1423,8	1967,4	1972,2	1312,4	393,2	199,5	128,5	268,1	1140,7	AH-03/04	128,5	1972,2
AH-04/05	300,7	412,1	784,8	750,0	825,0	776,1	1005,7	520,7	198,8	143,6	99,7	68,0	490,4	AH-04/05	68,0	1005,7
AH-05/06	360,9	817,1	852,6	865,4	619,5	1528,7	815,2	313,2	253,7	149,5	112,1	318,0	583,8	AH-05/06	112,1	1528,7
B_Q_O (MW)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	MEDIA ANUAL	B_Q_O (MW)	Mín.	Máx.
AH-02/03	19,4	40,1	148,0	275,0	227,2	151,4	112,4	132,4	39,8	23,0	18,5	46,9	102,8	AH-02/03	18,5	275,0
AH-03/04	103,0	212,0	168,4	173,4	130,5	179,5	203,8	136,8	42,5	28,3	18,9	30,5	118,9	AH-03/04	18,9	212,0
AH-04/05	38,8	48,4	80,2	68,3	79,0	80,7	104,3	68,2	25,4	19,7	14,6	9,2	53,1	AH-04/05	9,2	104,3
AH-05/06	61,8	146,3	150,4	177,1	122,9	309,7	154,3	58,6	60,5	43,7	28,8	61,2	114,6	AH-05/06	28,8	309,7
B_T (MW)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	MEDIA ANUAL	B_T (MW)	Mín.	Máx.
AH-02/03	13,6	19,9	31,7	163,3	169,4	38,6	8,3	41,3	83,5	47,3	27,6	86,8	61,0	AH-02/03	8,3	169,4
AH-03/04	99,4	185,7	35,2	93,9	55,9	400,0	56,8	26,6	107,0	61,5	40,7	52,6	101,3	AH-03/04	26,6	400,0
AH-04/05	30,7	57,3	52,1	80,8	78,2	119,1	16,2	9,7	46,1	39,2	14,2	8,3	46,0	AH-04/05	8,3	119,1
AH-05/06	18,4	95,3	138,1	99,2	45,8	42,7	12,3	12,8	29,7	18,0	12,9	27,0	46,0	AH-05/06	12,3	138,1

Tabla 10: Resumen de los resultados en los cálculos de exergía en unidades de energía (GWh).

B_P (GWh)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	TOT. ANUAL	B_P (GWh)	Mín.	Máx.
AH-02/03	159,3	223,9	1472,2	2011,5	1894,4	1139,0	815,6	917,7	219,3	217,4	122,0	189,9	9382,3	AH-02/03	122,0	2011,5
AH-03/04	593,7	976,1	1082,9	1691,5	1026,0	1669,8	1430,0	935,8	203,4	150,2	161,0	179,5	10099,8	AH-03/04	150,2	1691,5
AH-04/05	237,9	437,0	907,2	912,4	976,6	1028,0	1146,7	546,5	137,9	266,4	209,6	52,0	6858,1	AH-04/05	52,0	1146,7
AH-05/06	281,0	774,4	882,1	808,8	553,5	1444,0	739,3	288,8	171,2	194,6	212,4	167,4	6517,4	AH-05/06	167,4	1444,0
B_Q_I (GWh)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	TOT. ANUAL	B_Q_I (GWh)	Mín.	Máx.
AH-02/03	2,1	22,2	953,2	1480,5	1622,3	1113,1	737,0	951,0	272,9	125,0	86,2	270,3	7635,7	AH-02/03	2,1	1622,3
AH-03/04	668,0	1215,0	1120,9	1436,6	956,8	1463,8	1420,0	976,4	283,1	148,4	95,6	193,0	9977,6	AH-03/04	95,6	1463,8
AH-04/05	223,7	296,7	583,9	558,0	554,4	577,4	724,1	387,4	143,2	106,9	74,2	49,0	4278,8	AH-04/05	49,0	724,1
AH-05/06	268,5	588,3	634,4	643,8	416,3	1137,4	587,0	233,0	182,6	111,2	83,4	229,0	5114,9	AH-05/06	83,4	1137,4
B_Q_O (GWh)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	TOT. ANUAL	B_Q_O (GWh)	Mín.	Máx.
AH-02/03	14,4	29,8	110,1	204,6	169,0	112,6	83,7	98,5	29,6	17,1	13,7	34,9	918,2	AH-02/03	13,7	204,6
AH-03/04	76,7	157,7	125,3	129,0	97,1	133,5	151,6	101,7	31,6	21,1	14,1	22,7	1062,0	AH-03/04	14,1	157,7
AH-04/05	28,9	36,0	59,7	50,9	58,8	60,1	77,6	50,7	18,9	14,7	10,8	6,8	473,9	AH-04/05	6,8	77,6
AH-05/06	46,0	108,8	111,9	131,7	91,5	230,4	114,8	43,6	45,0	32,5	21,5	45,6	1023,3	AH-05/06	21,5	230,4
B_T (GWh)	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	TOT. ANUAL	B_T (GWh)	Mín.	Máx.
AH-02/03	10,1	14,4	23,6	121,5	113,8	28,7	6,0	30,7	60,2	35,2	20,6	62,5	527,3	AH-02/03	4,1	121,5
AH-03/04	74,0	133,7	26,2	69,9	37,5	297,6	40,9	19,8	77,0	45,7	30,3	37,9	890,5	AH-03/04	17,9	297,6
AH-04/05	22,8	41,2	38,8	60,1	52,6	88,6	11,7	7,2	33,2	29,1	10,5	6,0	401,8	AH-04/05	4,1	88,6
AH-05/06	13,7	68,6	102,7	73,8	30,8	31,7	8,8	9,5	21,4	13,4	9,6	19,4	403,5	AH-05/06	7,0	102,7



G. 38: Comparativa de los diferentes componentes de exergía.

Como puede observarse, las componentes más importantes, con muchísima diferencia, son la potencial y la química orgánica, de un orden de magnitud diez veces mayor que las componentes térmica y química orgánica.

8. Indicadores propuestos.

A continuación se propone una serie de indicadores para evaluar el potencial hidroeléctrico, térmico de enfriamiento y osmótico del río y el aprovechamiento que se hace de estos potenciales.

8.1. Índice de Uso Potencial.

A continuación se propone el Índice de Uso Potencial del río (IUP). Se trata simplemente de un cociente entre la producción hidroeléctrica y el potencial máximo obtenido mediante los cálculos realizados. Este índice puede calcularse empleando las energías o las potencias. Véase realizado en ambos casos:

	Bp (MW)	Bp (GWh)	Pot. Inst. (MW)	Generac. (GWh)	IUP_potencia	IUP_energía
2002/03	1079,0	9382,3	865	1935	0,80	0,21
2003/04	1154,0	10099,8	865	1935	0,75	0,19
2004/05	786,5	6858,1	865	1935	1,10	0,28
2005/06	743,6	6517,4	865	1935	1,16	0,30
Media	940,8	8214,4	865	1935	0,92	0,24

Tabla 11: Cálculo de Índice de Uso Potencial

- *Bp (MW)* es la media anual, en unidades de potencia, de las integraciones mensuales del perfil completo del río, y está recogida en la Tabla 9.
- *Bp (GWh)* es la suma total, en unidades de energía, de todos los meses del año, en los que se ha integrado el perfil del río. Los datos están en la Tabla 10.
- *Pot. Inst.* es la potencia instalada en el cauce principal del río Ebro, disponible en la Tabla 2.
- *Generac.* es la generación anual de energía que tiene lugar en el cauce principal del río Ebro y se encuentra disponible en la Tabla 2.
- *IUP_potencia* es el Índice de Uso Potencial, cociente de potencias, resultado de dividir *Pot. Inst.* entre *Bp (MW)*.
- *IUP_energía* es el Índice de Uso Potencial, cociente de energías, resultado de dividir *Generac.* entre *Bp (GWh)*.

El *IUP_potencia* se encuentra cercano a la unidad, en ocasiones lo sobrepasa y en ocasiones no lo alcanza, esto depende de si el año es húmedo o seco, pero en general se puede observar como la potencia instalada se aproxima mucho al máximo de potencia aprovechable.

Sin embargo, puede observarse como el *IUP_energía* apenas alcanza valores de 0,25; esto es debido a que las centrales no funcionan todas las horas del año y a que no se aprovecha el potencial hidroeléctrico en todos los tramos del río.

8.2. Índice de Uso Térmico.

Para el cálculo del Índice de Uso Térmico se necesitan los datos de las centrales localizadas en el cauce principal del río:

Ciclo combinado	Empresa	Potencia MW	Producción GWh	horas operación	Concesión m3/s	Vol. máximo, hm3/año
Arrubal 1	GAS NATURAL, SDG	402	899	2868	0,23	5,80
Arrubal 2	GAS NATURAL, SDG	397	926	2979	0,23	5,80
Castejón 1	EL. RIBERA DEL EBRO	399	1002	3843	0,28	8,83
Castejón 2	EL. RIBERA DEL EBRO	378	1508	5103	0,28	8,83
Castejón 3	IBERDROLA	426	1184	4401	0,15	9,46
Escatrón 3	E.ON GENERACIÓN	818	4561	7597	0,35	10,94
Escatrón Peaker	GLOBAL 3 COMBI SLU	297	161	2592	0,10	3,15
TOTAL		3117	10241	29383	1,61	52,82
Nuclear	Empresa	Potencia MW	Producción GWh	horas operación	Concesión m3/s	Vol. máximo, hm3/año
Garoña	NUCLENOR	466	3575	7856	24,35	767,78
Ascó 1	ENDESA	1028	5659	5761	38,66	1219,18
Ascó 2	ENDESA 85% IBERDROLA 15%	1027	8191	8082	38,66	1219,18
TOTAL		2521	17425	21699	101,67	3206,14

Tabla 12: Centrales térmicas en el cauce principal del Ebro (Uche, 2010).

A partir de la potencia generada en cada central, se realiza una estimación del potencial térmico aprovechado en las centrales termoeléctricas del cauce principal del Ebro (ciclo abierto en las Centrales Nucleares y cerrado en las de Ciclo Combinado). Suponiendo un rendimiento global del 55% y 35% respectivamente, se puede calcular cuál es la energía total proveniente del combustible (Q_{comb}), así como la energía cedida en el condensador (Q_{cond}) y, por tanto, la exergía suministrada a la corriente de agua extraída del cauce.

	TI PO	Potencia (MW)	Producción (GWh)	Horas operación	Concesión (m3/s)	Q_comb (MW)	Q_cond (MW)	ΔT concesión (K)	Q_cond (GWh)	B_t (GWh)	IUT
Arrúbal1	CC	402	899	2868	0,23	731	329	-	943	-	-
Arrúbal2	CC	397	926	2979	0,23	722	325	-	968	-	-
Castejón1	CC	399	1002	3843	0,28	725	326	-	1255	-	-
Castejón2	CC	378	1508	5103	0,28	687	309	-	1578	-	-
Castejón3	CC	426	1184	4401	0,15	775	349	-	1534	-	-
Escatrón3	CC	818	4561	7597	0,35	1487	669	-	5084	-	-
EscatrónP	CC	297	161	2592	0,10	540	243	-	630	-	-
Garofía	N	466	3575	7856	24,35	1331	865	9	6799	-	-
Ascó 1	N	1028	5659	5761	38,66	2937	1909	12	10999	-	-
Ascó 2	N	1027	8191	8082	38,66	2934	1907	12	15415	-	-
TOTAL									45204	556	81

Tabla 13: Cálculo del Índice de Uso Térmico (IUT).

$$\dot{Q}_{comb}(MW) = \frac{\dot{P}ot(MW)}{rend}$$

$$\dot{Q}_{cond}(MW) = \dot{Q}_{comb}(MW) - \dot{P}ot(MW)$$

$$Q_{cond} (GWh) = \dot{Q}_{cond}(MW) * Horas\ operación(h)/1000$$

$$IUT = \frac{Q_{cond}(GWh)}{B_t(GWh)}$$

El IUT es mucho mayor que la unidad (en el ejemplo es 81), es decir, la refrigeración le aporta exergía al flujo captado del cauce, al elevar su temperatura muy por encima de la referencia (agua de mar). Posteriormente, dicho calentamiento no es aprovechado por parte del ser humano en ninguna actividad, por lo que es una pérdida energética relevante.

8.3. Índice de Uso Químico. Coste de Desalación Potencial.

El Índice de Uso Químico (IUQ) natural, mediría el uso del potencial químico del agua dulce con respecto al agua salada. Este índice es cero, ya que no hay aprovechamiento directo de este desequilibrio osmótico que genera exergía en el río con respecto al mar (creado por el ciclo hidrológico natural).

Sin embargo, se puede evaluar el ahorro energético que supone el uso de agua dulce frente al hipotético caso en que fuera necesario obtenerla mediante desalación, mediante un rendimiento de transformación energético en la tecnología de desalación de agua de mar correspondiente. Para este trabajo se va a tomar un coste energético de desalación del agua del mar de $3,1 \text{ kWh/m}^3$ (Latorre, 2004).

SISTEMA	MEDIA 88-89/02-03
Sistema cabecera del Ebro (Lodosa, Imperial y Tauste)	1.185
Canales de Urgell	575
Canal de Aragón y Cataluña	539
Riegos del Alto Aragón	836
Sistema Bardenas	552
TOTAL	3.687

Tabla 14: Suministro de los grandes sistemas de riego ($\text{hm}^3/\text{año}$) (C. H. del Ebro):

La cantidad media de agua tomada del cauce principal es de $1.185 \text{ hm}^3/\text{año}$ (canales de Lodosa, Imperial de Aragón y de Tauste). Por tanto, a lo largo de un año, el coste energético de desalar todo el caudal consumido en el eje del Ebro sería:

Coste Potencial de Desalación (CDP) =

$$1185 \frac{\text{hm}^3}{\text{año}} * 3,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} * 1000000 \frac{\text{m}^3}{\text{hm}^3} * \frac{1}{1000000} \frac{\text{GWh}}{\text{kWh}} = 3673,5 \text{ GWh/año}$$

Una cantidad mayor de energía que, por ejemplo, la generada por la central nuclear de Garoña a lo largo de un año, lo que da una idea de la importancia de ahorrar toda el agua posible, ya que si hubiera que producirla, el gasto energético sería inasumible hoy en día.

9. Conclusiones: ¿qué información adicional aportan los indicadores relacionados con la exergía?

Es importante distinguir, dentro de la exergía presente en el agua, dos categorías diferentes: natural y antrópica. La altura y la temperatura, y una parte de la salinidad (la debida a la escorrentia en los distintos tipos de suelo del Valle), son parámetros determinados naturalmente; mientras que otra parte de la salinidad, consecuencia de los usos agrarios y urbanos, y la materia orgánica, son parámetros determinados por las actividades económicas del ser humano.

A partir de esta distinción, cabe señalar la existencia de dos líneas de acción desde el punto de vista del aprovechamiento energético:

- ❖ Una primera línea, que radica en la importancia de la explotación de la exergía natural que se brinda al ser humano, y que fundamentalmente consiste en la utilización de las componentes térmica, potencial y química inorgánica. En el primer caso, mediante el aprovechamiento del agua fría para refrigerar, climatizar... En el segundo caso, mediante la producción de energía hidroeléctrica. Y en el tercer caso, mediante el consumo de agua dulce.
- ❖ Y una segunda, que radica en la importancia de evitar la contaminación del agua con materia orgánica e inorgánica, para ahorrar gastos en depuración.

Las claves son sencillas: es menester la explotación de la altura, temperatura y dulzura del agua, puesto que bombear, refrigerar y desalar suponen un coste energético parcial o totalmente evitable. De la misma manera, es también necesario evitar en lo posible la contaminación por adición al agua de materia, sea orgánica o inorgánica, puesto que depurar cuesta energía.

En este aspecto, las ventajas que ofrece la exergía como indicador son las siguientes:

- Permite comparar de forma general el potencial natural del ciclo hidrológico -en forma de altura, temperatura, salinidad- con el realmente aprovechado por las actuales tecnologías ingenieriles.
- En línea opuesta a lo anterior, da la posibilidad de medir, en unidades de energía, el coste de la restauración de la calidad y la cantidad del recurso objeto de estudio (a través de tecnologías de tratamiento de aguas).
- Puede desagregar los diferentes tipos de contaminación y clasificarlos, según su procedencia, en antrópica o natural, y los distintos usos económicos.
- Permite medir la explotación de los diferentes tipos de recursos naturales mediante ratios de aprovechamiento energético: otorga la posibilidad de comparar, en términos de disponibilidad energética y aprovechamiento, un recurso con otro, o el mismo recurso en dos épocas diferentes.

Bibliografía

- AEMA. (s.f.). *Agencia Europea del Medio Ambiente*. Recuperado el 11 de Enero de 2011, de <http://www.eea.europa.eu/es>
- C. H. del Ebro. (2008). Organismos de Cuenca del siglo XXI. En M. Omedas, C. Benítez, B. Mora, & R. Galván. Zaragoza.
- C. H. del Ebro. (s.f.). *Calidad de aguas*. Recuperado el 10 de Agosto de 2010, de <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/cemas/inicio.htm>
- C. H. del Ebro. (s.f.). *chebro*. Recuperado el 7 de Marzo de 2011, de <http://www.chebro.es/>
- C. H. del Ebro. (s.f.). *SAIH*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2010, de <http://195.55.247.237/saihebro/index.php?url=/historicos/peticion>
- C. H. del Ebro. (s.f.). *SITEbro*. Recuperado el 1 de Julio de 2010, de <http://iber.chebro.es/sitebro/sitebro.aspx>
- C.H. del Ebro. (2010). *Proyecto de Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro*.
- Carrasquer, B. (2011). Comunicación directa.
- Diario Oficial de las Comunidades Europeas. (2000). Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- Environment Canada. (s.f.). *Environment Canada*. Recuperado el 11 de Enero de 2011, de <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=En>
- FAO. (s.f.). *Aquastat*. Recuperado el 20 de Marzo de 2011, de <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es>
- F-Chart Software. (s.f.). *EES*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2010, de <http://www.fchart.com/ees/>
- GEA. (s.f.). *Gran Enciclopedia Aragonesa*. Recuperado el 7 de Marzo de 2011, de <http://www.encyclopedia-aragonesa.com/>
- Latorre, M. (2004). IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Tortosa.
- MARM. (s.f.). *MARM*. Recuperado el 11 de Enero de 2011, de <http://www.marm.es/>
- Martínez, A. (2009). *Exergy cost assessment of water resources: Physical Hydraulics*. Zaragoza.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater engineering treatment and reuse*. McGraw-Hill Higher Education.
- National Academy of Science. (s.f.). *National Academy of Science*. Recuperado el 11 de Enero de 2011, de <http://www.nasonline.org/site/PageServer>
- OCDE. (1994). *Environmental indicators: OECD core set*. Paris.
- OCDE. (2001). *Environmental Indicators. Towards Sustainable Development*. France.
- OCDE. (2002). *Aggregated Environmental Indices. Review of Aggregatio Methodologies in Use*. France.

- OCDE. (2004). *Key Environmental Indicators*. France.
- OCDE. (2004). *OECD Environmental Data - Compendium*. Paris.
- Parlamento Europeo y del Consejo. (23 de Octubre de 2000). Directiva 2000/60/CE.
- Perry, R., & Green, D. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Knovel. Mc-Graw-Hill.
- The Exergoecology Portal*. (s.f.). Recuperado el 11 de Abril de 2011, de <http://www.exergoecology.com/exergo/>
- Uche, J. (2010). Comunicación directa.
- Universidad Politécnica de Valencia. (s.f.). *Portal de desarrollo de Aquatool*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2010, de <http://www.upv.es/aquatool/>
- Valero. (1998). *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Roma.
- Wall, G. (1986). *Exergy -A useful concept*.
- Zaleta-Aguilar, A., Ranz, L., & Valero, A. (1998). *Towards a Unified measure of renewable resources availability: The exergy method applied to the water of a river*.

Índice de tablas.

Tabla 1: Aprovechamientos energéticos en toda la cuenca del Ebro. Potencia instalada y producción...	28
Tabla 2: Aprovechamientos energéticos en el cauce principal del Ebro. Potencia instalada y producción.	28
Tabla 3: Relación parámetro determinante – componente de exergía.	49
Tabla 4: Listado de tramos en que es dividido el río Ebro.	52
Tabla 5: Longitudes y altitudes de los tramos del Ebro.	54
Tabla 6: Ejemplo de caudales en cada tramo para el mes de octubre del 2002.	56
Tabla 7: Ejemplo de estaciones CEMAS correspondientes a cada tramo del Ebro.	57
Tabla 8: Ejemplo de tabla de datos para el amonio.	60
Tabla 9: Resumen de los resultados en los cálculos de exergía en unidades de potencia (MW).	93
Tabla 10: Resumen de los resultados en los cálculos de exergía en unidades de energía (GWh).	94
Tabla 11: Cálculo de Índice de Uso Potencial.	97
Tabla 12: Centrales térmicas en el cauce principal del Ebro (Uche, 2010).	98
Tabla 13: Cálculo del Índice de Uso Térmico (IUT).	99
Tabla 14: Suministro de los grandes sistemas de riego (hm ³ /año) (C. H. del Ebro):	100

Índice de figuras.

Figura 1: Esquema Presión – Estado – Respuesta para la clasificación de indicadores.	7
Figura 2: Presiones indirectas y presiones directas.	8
Figura 3: Estado del Medio Ambiente.	9
Figura 4: Acciones de respuesta.	10
Figura 5: Esquema DPSIR. Factor determinante, presión, estado, impacto y respuesta.	12
Figura 6: Mapa de indicadores: factores antrópicos. Ministerio de Medio Ambiente.	16
Figura 7: Mapa de indicadores: factores naturales. Ministerio de Medio Ambiente.	17
Figura 8: Cuenca del Ebro. Orografía.	19
Figura 9: Territorio que comprende la Confederación Hidrográfica del Ebro.	21
Figura 10: Usos del agua en España (según Aquastat).	23
Figura 11: Gráfico sectorial. Porcentajes de los principales usos consuntivos del agua en España (FAO).	23
Figura 12: Desagregación del consumo de abastecimiento ($\text{hm}^3/\text{año}$).	24
Figura 13: Sistemas de abastecimiento de más de 20.000 habitantes.	24
Figura 14: Superficie dedicada al regadío en la Demarcación Hidrográfica del Ebro.	25
Figura 15: Gráfico sectorial: usos del agua en la industria manufacturera.	26
Figura 16: Centrales en la Demarcación Hidrográfica del Ebro.	27
Figura 17: SAIH. Sistema Automático de Información Hidrológica.	30
Figura 18: Red CEMAS. Control de Estado de las Masas de Agua Superficiales.	31
Figura 19: Estado ecológico de un ecosistema, desde el estado natural al estado cero.	35
Figura 20: Variación de la exergía específica a lo largo del cauce de un río.	37
Figura 21: Variación del caudal a lo largo del cauce de un río.	38
Figura 22: Variación de la exergía absoluta a lo largo del cauce de un río.	38
Figura 23: Variación de la exergía térmica del río en función de la temperatura.	42
Figura 24: Variación de la exergía mecánica en función de la presión.	43
Figura 25: Variación de la exergía potencial en función de la altura.	44
Figura 26: Variación de la exergía cinética en función de la velocidad.	45
Figura 27: Variación de la exergía química orgánica en función del Carbono Orgánico Total.	47
Figura 28: Variación de la exergía química en función de la concentración.	48
Figura 29: Esquema del Ebro dividido en tramos. Aquatool (Carrasquer, 2011).	51
Figura 30: Ejemplo: esquema del Noguera-Pallaresa dividido en tramos. Aquatool (Carrasquer, 2011).	51
Figura 31: Herramienta de visualización cartográfica SITEbro.	53
Figura 32: Midiendo altitudes mediante la herramienta SITEbro.	54
Figura 33: Solicitud de datos históricos. SAIH.	55
Figura 34: Red CEMAS. Control de Estado de las Masas de Agua Superficiales.	57
Figura 35: CEMAS. Resultados analíticos.	58
Figura 36: Ejemplo de hoja de resultados analíticos.	59
Figura 37: Muestra de la tabla de datos introducida en el EES y lista para comenzar el cálculo.	62
Figura 38: Perfil real del río y perfil discreto calculado (Martínez, 2009).	92

Índice de gráficas.

G. 1: Variación del caudal en la desembocadura a lo largo del año.	64
G. 2: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2002-03.	65
G. 3: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2003-04.	66
G. 4: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2004-05.	66
G. 5: Evolución del caudal a lo largo del cauce. Año Hidrológico 2005-06.	67
G. 6: Variación de la altura a lo largo del cauce.	68
G. 7: Variación de la temperatura en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	69
G. 8: Temperatura a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	70
G. 9: Temperatura a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	70
G. 10: Variación de la conductividad en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	71
G. 11: Conductividad a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	72
G. 12: Conductividad a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	72
G. 13: Variación del COT en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	73
G. 14: COT a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	74
G. 15: COT a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	75
G. 16: Exergía potencial específica a lo largo del cauce del Ebro.	76
G. 17: Variación de la exergía térmica específica en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	77
G. 18: Exergía térmica específica a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	78
G. 19: Exergía térmica específica a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	78
G. 20: Variación de la exergía química inorgánica específica en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	79
G. 21: Exergía química inorgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	80
G. 22: Exergía química inorgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	80
G. 23: Variación de la exergía química orgánica específica en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	81
G. 24: Exergía química orgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	82
G. 25: Exergía química orgánica específica a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	82
G. 26: Variación de la exergía potencial absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	83
G. 27: Exergía potencial absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	84
G. 28: Exergía potencial absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	84
G. 29: Variación de la exergía térmica absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	86
G. 30: Exergía térmica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	87
G. 31: Exergía térmica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	87
G. 32: Variación de la exergía química inorgánica absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	88
G. 33: Exergía química inorgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	89
G. 34: Exergía química inorgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	89
G. 35: Variación de la exergía química orgánica absoluta en el último tramo del Ebro en función del tiempo.	90
G. 36: Exergía química orgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2003-04.	91
G. 37: Exergía química orgánica absoluta a lo largo del cauce. A.H. 2004-05.	91
G. 38: Comparativa de los diferentes componentes de exergía.	95